

**ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ESTRUCTURAL – GEOMORFOLÓGICA POR
CAUSA DEL FENÓMENO DE DIAPIRISMO DE LODO EN EL CARIBE
COLOMBIANO: UNA APROXIMACIÓN**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de *Geóloga*.

Ana María Burgos Castaño

aburgos1@eafit.edu.co

Asesor

Geólogo: PhD, Jose Fernando Duque Trujillo

jduquetr@eafit.edu.co

Universidad EAFIT

Departamento de Geología

Medellín

2020

Agradecimientos

El primer y más especial agradecimiento es para mi madre Nancy y padre Miguel, quienes toda la vida me han apoyado e inspirado a ser una mejor persona y profesional; es gracias a ellos que mi curiosidad y sed de conocimiento han crecido cada día, pues han dado lo mejor de sí para que yo hoy pueda estar donde estoy ahora.

Agradezco a toda mi familia, que siempre me ha dado su cariño incondicional. Gracias a mi hermana Marcela, que me brindó los primeros consejos sobre la vida universitaria . A mis primas, Yuly y Stacy, con quienes viví gran parte de mi vida, que soportaron mi carácter, estuvieron conmigo en las adversidades y creyeron en mí siempre.

A mis maestros, quienes estimularon mis ganas de conocimiento, que no permitieron que me quedara con dudas, que siempre han estado dispuestos a ayudarme y motivarme a seguir investigando. Gracias a mi asesor, Jose Duque, por haber sido tan paciente, ser un guía durante toda la carrera y por darme la confianza que necesitaba para sacar adelante este proyecto. Gracias a los profesores Camilo Bustamante, Juan Darío Restrepo y Marco Fidel Gamboa que siempre exigieron más, no permitieron que me quedara con lo mínimo y me alentaron a siempre dar lo mejor de mí.

Por último, pero no menos importante, quiero darle mis más sinceros agradecimientos a mis compañeros y amigos más leales, sin ustedes, el ambiente universitario no habría sido soportable. Gracias por las experiencias que adquirimos juntos al trabajar, ir a campo, estudiar y reír con ustedes: Leandro, César, Óscar, Verónica y Juan Fernando. También muchas gracias a Dani por sus consejos sobre cartografía.

Per aspera ad Astra

En memoria de Lucas y Heidelberg

Contenido

1. Introducción.....	1
2. Objetivos y alcances.....	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. Localización.....	3
4. Contexto regional.....	5
4.1. Tectónica.....	5
4.2. Geología.....	8
4.2.1. Cinturón del Sinú.....	8
i. Formación Arjona (PgNga).....	8
ii. Formación Bayunca (Ngb).....	8
iii. Formación Rotinet (Qpr).....	9
iv. Formación Arroyo Grande (Qpag).....	9
v. Formación La Popa (Qpp).....	9
4.2.2. Cinturón San Jacinto.....	10
i. Formación San Cayetano (Pgsc).....	10
ii. Formación Pendales (Pgp).....	11
iii. Formación Arroyo de Piedra (Pga).....	11
iv. Formación Las Perdices (PgNgp).....	11
v. Formación Hibácharo (Ngh).....	11
vi. Formación Turbará (Ngt).....	11
4.3. Geología estructural.....	12
4.4. Geomorfología.....	15
5. Marco teórico.....	18
6. Antecedentes.....	19
6.1. Diapirismo de lodo en el mundo.....	19
6.2. Diapirismo de lodo en el Caribe Colombiano.....	21
6.2.1. Volcán de Lodo Galerazamba.....	22
6.2.2. Volcán de Lodo Las Palomas.....	23

6.2.3. Volcán de Lodo Pueblo Nuevo.....	23
6.2.4. Volcán de Lodo El Totumo.....	24
6.2.5. Volcán de Lodo La Bonga.....	24
6.2.6. Volcán de Lodo de Yerbabuena.....	25
6.2.7. Volcán de Lodo El Reposo.....	25
6.2.8. Volcán de Lodo El Rodeo.....	26
6.2.9. Volcán de Lodo Membrillal.....	26
6.2.10. Volcán de Lodo Cañaveral.....	26
6.2.11. Volcán de Lodo Turbaco.....	27
6.2.12. Volcán de Lodo Santa Catalina.....	28
6.2.13. Volcán de Lodo Clemencia.....	28
6.2.14. Volcán de Lodo Flamenco.....	28
6.2.15. Volcán de Lodo La Lomita.....	29
6.2.16. Volcán de Lodo La Laguna.....	29
6.2.17. Volcán submarino de Galerazamba.....	30
6.2.18. Volcán submarino Punta Canoas.....	30
7. Metodología.....	31
8. Resultados.....	32
9. Discusión.....	38
9.1. Sector Galerazamba.....	40
9.2. Sector Santa Catalina.....	40
9.3. Sector Cartagena.....	41
9.4. Sector María La Baja.....	41
10. Conclusiones y recomendaciones.....	47
11. Referencias.....	49
12. Anexos.....	53

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio y las respectivas planchas geológicas. Fuente: propia. Los datos de las hojas geológicas fueron tomados de la base de datos del Servicio Geológico Colombiano	4
Figura 2. Mapa de placas tectónicas relacionadas a la zona Caribe colombiana; recuadro negro al NW del mapa hace referencia a la zona de estudio. Tomado y modificado del Laboratorio de Mapeo CEELAT	5
Figura 3. A la izquierda, configuración tectónica del NW de Suramérica; en el recuadro rojo: NAB = Northern Andean Block (Bloque Norandino); Car = Placa Caribe; Nam = Placa Norteamericana; Afr = Placa Africana, Coc = Placa de Cocos; Nzc = Placa Nazca	6
Figura 4. Localización general de los Cinturones Sinú y San Jacinto en el NW de Colombia. La ubicación de los cinturones fue extraída de Lozano y Zamora, 2014. Fuente: propia sobre mapa base de ArcGIS	7
Figura 5. Columnas estratigráficas de las principales formaciones geológicas correspondientes al Cinturón del Sinú aflorantes en el área de estudio. Fuente: propia ..	10
Figura 6. Mapa geológico general de la zona de estudio tomado y modificado del Mapa Geológico de Colombia (SGC, 2019) escala 1:2.000.000. Nótese la edad de las rocas que corresponden principalmente a las formaciones del Cinturón del Sinú. Formaciones geológicas relacionadas a rocas sedimentarias de ambiente Transicional Marino: Bayunca (Ngb); relacionadas a ambiente Marino: Hibácharo (Ngh) y Turbará (Ngh); relacionadas a depósitos cuaternarios: Rotinet (Qpp), Arroyo Grande (Qpag) y La Popa (Qpp).	12
Figura 7. Mapa estructural generalizado con las principales fallas y pliegues de la zona de estudio. Se observa que las fallas inversas o de cabalgamiento son las más comunes. Fuente: propia sobre mapa base de ArcGIS y planchas geológicas del Servicio Geológico	13
Figura 8. Esquema de caracterización geomorfológica según la escala. Adaptado de Ingeominas (2000).....	16
Figura 9. Mapa geomorfológico general de la zona. La escala es 1:100 000 y se alcanzan a apreciar algunas unidades. Tomado y modificado de Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA)	17
Figura 10. Migración de lodo generando diapirismo y emplazamiento en rocas preexistentes. Eventual manifestación en superficie conocida como volcanes de lodo. Tomado y modificado de Giraldo et al., 2012	19
Figura 11. Principales localidades mundiales donde se ha reportado el fenómeno de diapirismo y volcanismo de lodo. Adaptado y modificado de Kopf, 2003 en González y Rodríguez, 2005	20
Figura 12. A la izquierda, manadero del Volcán de lodo Galerazamba. Tomado de Germán Gómez, tomado del periódico El Universal (2012). A la derecha, manadero en la cima NW del volcán. Tomado de Carvajal (2017)	23
Figura 13a. Vista hacia el E de los manaderos presentes en el cráter del volcán Santa Catalina. Tomado de Carvajal (2017). Figura 13b. Cráter de Volcán de lodo Las Palomas. Tomado de Carvajal (2017)	23

Figura 14. Volcán de lodo El Totumo. Se observa la estructura principal del manadero del principal volcán de lodo turístico del departamento de Bolívar. Tomados de El Universal (2014)	24
Figura 15. Vista hacia el SE de la estructura volcánica de lodo La Bonga. Tomado de Carvajal (2017)	24
Figura 16. Manaderos del Volcán de lodo Yerbabuena. A la izquierda se observan algunos flujos de lodo y grietas de desecación. A la derecha, detalles de uno de los manaderos del volcán de lodo. Fotografías tomadas por Lyda Pinzón, 2008. Obtenidas de Carvajal (2017)	25
Figura 17. Bocas en el cráter del volcán de lodo El Reposo. Fotografías tomadas por Henry Carvajal, 1996. Obtenidas de Carvajal (2017)	25
Figura 18a. Detalles de uno de los manaderos del Volcán de lodo El Rodeo. Fotografía tomada por Henry Carvajal, 1996. Figura 18b. Flujos de lodo emitidos por el volcán de lodo a finales de 2012. Fotografía tomada por Henry Carvajal, 2013.....	26
Figura 19. Aspecto de una de las bocas del volcán en el barrio Membrillal en cercanías a viviendas. A la izquierda, fotografía tomada por Gloria Obando, 2013. A la derecha tomada del periódico RCN Radio, 2016.....	27
Figura 20. Manadero principal del volcán de lodo Cañaveral. Fotografía tomada por Henry Carvajal, 2008.....	27
Figura 21. Emanaciones del Volcán de lodo de Turbaco. Fotografías tomadas por Lyda Pinzón, 2008.....	27
Figura 22. Vista de manaderos de lodo en el sector Caracolí, en el municipio de Clemencia. Fotografía tomada por Carmen Castiblanco, 2009	28
Figura 23. Bocas de 15 a 20 cm de diámetro en el volcán de lodo Santa Catalina. Fotografía tomada por Henry Carvajal, 2009	28
Figura 24. Detalle de las bocas del volcán Flamenco y aspecto de los flujos de lodo procedentes de los manaderos. Los flujos más antiguos tienden a tornarse de color amarillento. Fotografías tomadas por Domingo Mendivelso, 2008.....	29
Figura 25. A la izquierda, manadero del volcán de lodo La Lomita. A la derecha, detalles de las bocas de los manaderos de lodo. Fotografías tomadas por Domingo Mendivelso, 2008	29
Figura 26. Distribución espacial de los volcanes de lodo de la zona de estudio. El número corresponde a los volcanes descritos anteriormente. Fuente: propia. Las coordenadas de los volcanes se extrajeron a partir de Carvajal (2017).....	30
Figura 27. Flujograma metodológico utilizado para el desarrollo del trabajo	31
Figura 28. Mapa de distribución espacial de los volcanes de lodo y las principales estructuras y unidades geomorfológicas de la zona. Fuente: propia. Para información detallada de las unidades geomorfológicas, remitirse al Anexo 1.	33
Figura 29. Mapa de área de influencia diapírica y estructural sobre unidades geomorfológicas en un radio de 1000 m.	34
Figura 30. Acercamiento de los cuatro sectores principales de la zona de estudio, seleccionados según la abundancia relativa de volcanes de lodo y características geomorfológicas. Los sectores fueron asignados en la figura 29. Sector a = Galerazamba; sector b = Santa Catalina; sector c = Cartagena; sector d = María La Baja.....	39
Figura 31. Frecuencia relativa de unidades geomorfológicas dentro del área de influencia determinada en la figura 30 (radio de 1 km).....	42

Figura 32. Área total de cada unidad geomorfológica en un radio de 1 km alrededor de los volcanes de lodo.....	42
Figura 33. Porcentaje total de área cubierto por las nueve unidades geomorfológicas principales que se encuentran dentro del área de influencia de los volcanes de lodo (1 km)	43
Figura 34. Proceso general de la formación de volcanes de lodo.....	46

Lista de Anexos

Anexo 1. Mapa de distribución espacial de los volcanes de lodo y las principales estructuras y unidades geomorfológicas del área de estudio.....	46
Anexo 2. Mapa de área de influencia diapírica y estructural sobre unidades geomorfológicas.....	47

1. Introducción

El margen Caribe colombiano está ubicado en una zona de complejidad tectónica que involucra la convergencia de las placas Suramérica, Caribe, Nazca y otros bloques menores en Centroamérica (Christofferson , 1984; Duque-Caro, 1984). Junto a este factor tectónico regional, existe una alta sedimentación aportada por los ríos Ranchería, Sinú y principalmente el Magdalena (Briceño y Vernet, 1992). En sitios donde se encuentran estas interacciones, comúnmente ocurren prismas acrecionarios hacia la zona costera (Barrera, 2001) y pueden originarse estructuras conocidas como *diapiros de lodo* (Kopf, 1998) debido a la actividad compresional. Si bien estos cuerpos de lodo pueden generarse en diversas configuraciones tectónicas, en el caso de Colombia se asocia este fenómeno a un marco regional de márgenes continentales, y se observan principalmente en el Cinturón del Sinú, según Duque-Caro (1979-1984).

Estos diapiros de lodo son estructuras aproximadamente verticales formadas por el ascenso de lodo a través de una columna de roca (O'Brien, 1968). Su distribución mundial es amplia y variada, y pueden presentarse tanto en tierra como costa afuera; además, son reconocidos por ser algunas de las características clásicas más dinámicas y estáticamente inestables del mundo (Hovland et al., 1997). Entre las principales localidades en Suramérica con diapiros de lodo se encuentran: Venezuela, Ecuador y el Delta del Río Magdalena en Colombia (Higgins y Saunders, 1974).

Hasta ahora, los mecanismos propuestos para explicar el origen del diapiroismo de lodo son pobremente entendidos, sin embargo, se estima que las causas más probables son el ascenso gravitacional por diferencia de densidades de los materiales en el subsuelo (Morgan et al., 1965), presión litostática (Duque-Caro, 1984), compresión tectónica (Higgins y Saunders, 1974; Galloway y Jackson, 1984; Vernet, 1985), acumulación de gases y sobrepresurización del sistema (Hedberg, 1974; Robertson y Kopf, 1998; Milkov, 2000).

Autores como Vernet (1986), Carvajal (1996, 2010, 2017) y Mendivelso (2010, 2017) han realizado numerosos estudios sobre el volcanismo de lodo en el Caribe colombiano y resaltan que es necesario indagar sobre la importancia del diapirismo arcilloso sobre la morfología de los terrenos.

A pesar de los avances en el estudio sobre el diapirismo, aún falta una caracterización completa de la geomorfología relacionada con procesos de volcanes de lodo terrestres (Oppo et al., 2020), lo que limita en gran medida la investigación de la influencia del fenómeno de diapirismo sobre la configuración morfológica del terreno. Es por esto, que en este trabajo se busca hacer una aproximación al análisis de la interacción y relación entre los volcanes de lodo y las unidades geomorfológicas de la línea de costa del Caribe colombiano, desde el municipio de María La Baja, hasta Galerazamba.

Palabras clave

Volcanismo de lodo, Diapirismo de lodo, Cinturón del Sinú, Geomorfología del Caribe Colombiano

2. Objetivos y alcances

2.1. Objetivo general:

Estudiar las estructuras geológicas del terreno para analizar cómo estas condicionan la geomorfología actual de la zona de estudio.

2.2. Objetivos específicos:

a) Analizar la información secundaria geológica disponible del área de estudio que comprenda unidades litológicas, fallas, lineamientos y deformaciones de la zona que pertenezcan al terreno Sinú – San Jacinto.

b) Realizar una geomorfología detallada actual del área de estudio que contenga los principales cuerpos de interés.

c) Identificar si existe la probabilidad de que la geología estructural y el diapirismo de lodo estén condicionando la morfología actual de la zona de estudio, desde María La Baja hasta el municipio de Galerazamba.

3. Localización

El área de estudio se encuentra localizada sobre el departamento de Bolívar, la zona suroccidental del departamento de Atlántico y la parte más norte del departamento de Sucre. Comprende las planchas geológicas escala 1:100.000, 16-17 (Barrera y Guzmán, 1998), 23 (Guzmán et al., 2003), 24 (Reyes y Zapata, 1998), 29-30 (Reyes et al., 1998), 31 (Reyes et al., 1998) y 37 (Guzmán et al., 1998) (figura 1).

Se sitúa entre las coordenadas geográficas 10°54' N, 75°2'W en el extremo norte y, 10°1'N, 75°10'W en el extremo sur, abordando el territorio hacia el occidente del mapa.

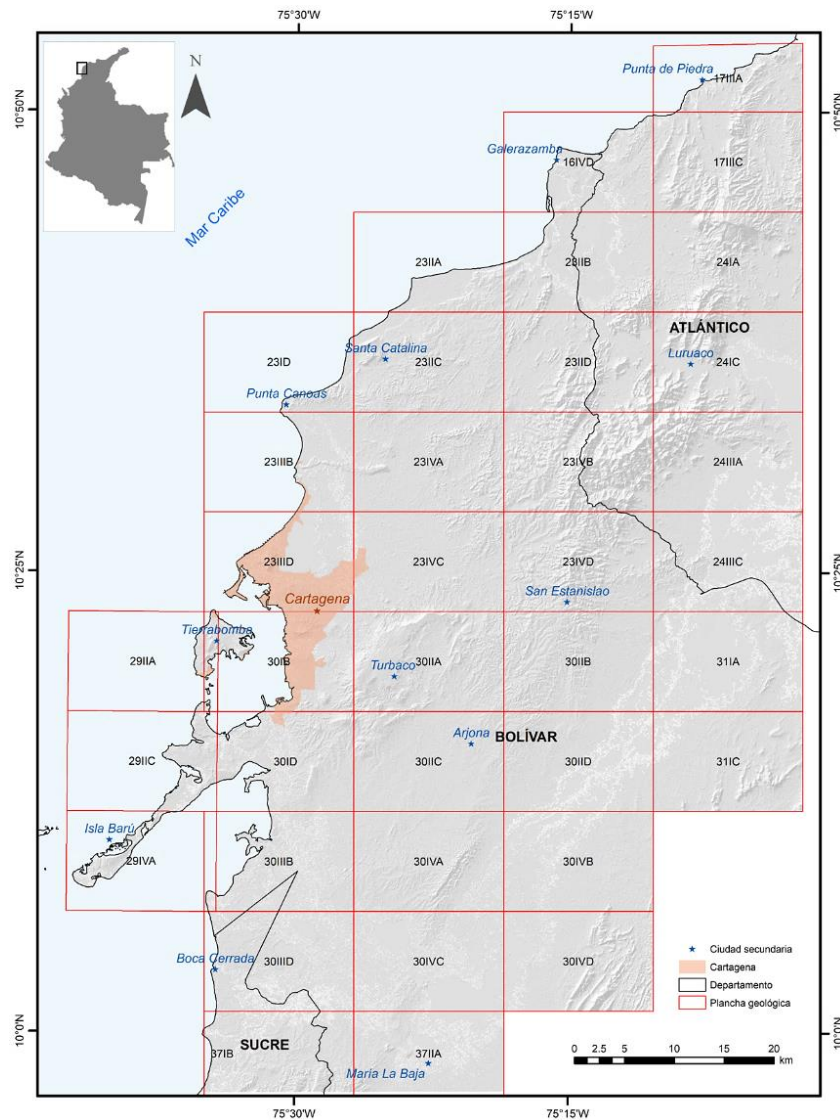


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio y las respectivas planchas geológicas. Fuente: propia. Los datos de las hojas geológicas fueron tomados de la base de datos del Servicio Geológico Colombiano

Dentro de la zona, se encuentra la ciudad de Cartagena de Indias, al noroccidente de Colombia sobre la orilla del Mar Caribe; esta ciudad es una de las más importantes de Colombia por ser principalmente turística y en 1984 declarada por la UNESCO como Patrimonio Cultural de la Humanidad, por lo que es necesario considerar que se encuentra en amenaza de pérdida de terreno debido al aumento del nivel relativo del mar (Andrade-Amaya et al., 2016).

Entre otros elementos geográficos importantes de la zona se encuentran la Isla de Tierrabomba, Isla Barú, Archipiélago del Rosario, Bahía de Cartagena y Galerazamba.

4. Contexto regional

4.1. Tectónica

La zona Caribe colombiana se caracteriza por la convergencia de las placas tectónicas de Nazca, Caribe y Suramérica (figura 2) con procesos de carácter no magmático y baja sismicidad (Duque-Caro, 1984; Guzmán, 2007; Gómez, 2015).



Figura 2. Mapa de placas tectónicas relacionadas a la zona Caribe colombiana; recuadro negro al NW del mapa hace referencia a la zona de estudio. Tomado y modificado del Laboratorio de Mapeo CEELAT

La zona de estudio está ubicada sobre lo que Cediél (2003) denomina Bloque Norandino (figura 3), y diversos autores como Gansser (1973) y Meijer (1995) lo han reconocido como un segmento geológico distintivo de la Cordillera de los Andes relacionado a la formación y evolución de la Placa Caribe.

Durante el periodo Cenozoico se conformaron en la zona sur del Caribe dos cinturones acrecionales conocidos como el Cinturón del Sinú, en la parte más occidental, y el Cinturón de San Jacinto, en la parte central asociados a la subducción de la Placa Caribe debajo de la placa Suramérica (Barrera, 2001; Aguilera, 2011). El frente del cinturón deformado del Sinú desaparece bajo el delta del río Magdalena y presenta dos direcciones estructurales diferentes: al este del Magdalena tiene una dirección preferencial este – oeste, en tanto que al oeste del Magdalena las direcciones estructurales se orientan ~ 35° N (Vermette, 1985 y 1986).

Los cinturones deformados Sinú y San Jacinto (ver figura 3) corresponden a una provincia tectono-estratigráfica (Reyes et al., 2001) limitada al Este por el Lineamiento estructural de Romeral, al Oeste por el Lineamiento de Colombia (Duque-Caro, 1984), al Norte por la Falla de Oca, al Suroeste por el sistema de fallas de Uramita y al Sur por la Cordillera Occidental (Lozano et al., 2014), y se extiende desde el Golfo de Urabá hasta Barranquilla (Ingeominas, 2010).

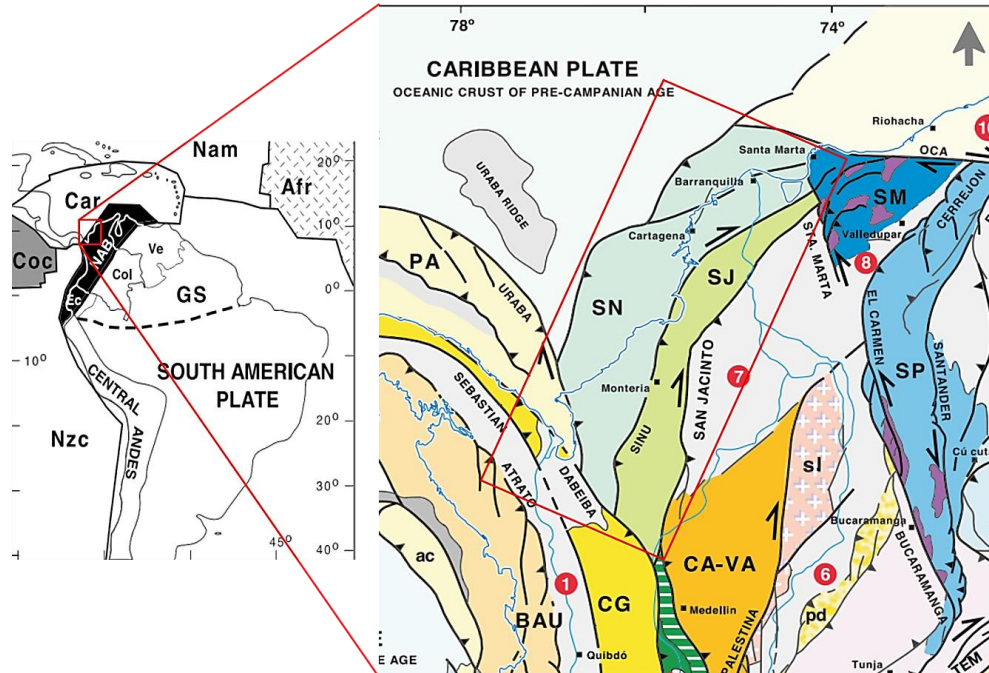


Figura 3. A la izquierda, configuración tectónica del NW de Suramérica; en el recuadro rojo: NAB = Northern Andean Block (Bloque Norandino); Car = Placa Caribe; Nam = Placa Norteamericana; Afr = Placa Africana, Coc = Placa de Cocos; Nzc = Placa Nazca

Los cinturones Sinú y San Jacinto se encuentran separados por el Lineamiento de Sinú, una estructura extensa con dirección NNE – SSO, que se interna en el Golfo de Morrosquillo, donde está sumergido; se evidencia nuevamente en el continente al Este de Cartagena y finalmente vuelve sumergirse a la altura de Galerazamba (ver figura 4) (Ujueta-Lozano, 2007). Estos dos cinturones están compuestos por fallas inversas, generalmente de cabalgamiento y con buzamientos promedio de 30° a 40° y rumbo entre N30°E a N40°E, sin embargo, se encuentran algunas fallas con 60° de buzamiento, como la Falla Buenos Aires, y otras con 25°, como lo es la Falla Henequén (Reyes et al., 2001).

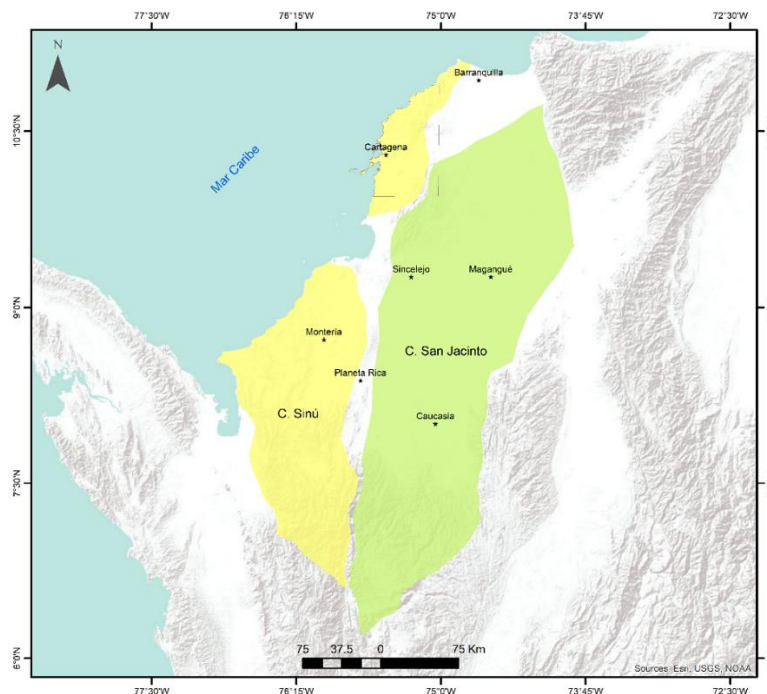


Figura 4. Localización general de los Cinturones Sinú y San Jacinto en el NW de Colombia. La ubicación de los cinturones fue extraída de Lozano y Zamora, 2014. Fuente: propia sobre mapa base de ArcGIS

En el caso de la zona de estudio, se observa mayor influencia geológica y estructural por parte del Cinturón Plegado del Sinú (Vernette, 1989), cuyos eventos tectónicos relacionados a la interacción entre las placas Suramericana, Caribe y

Nazca principalmente, conforman dos bloques tectónicos: Turbaco y Cartagena (Ingeominas, 2010).

4.2. Geología

La provincia tectono-estratigráfica Sinú – San Jacinto se caracteriza por un conjunto de rocas sedimentarias de origen marino que datan del Cretácico Tardío - Paleoceno hasta la actualidad (Reyes et al., 2001), y debido a las constantes interacciones tectónicas, se desarrollan en el área focos de diapirismo arcilloso, tanto en tierra como en la plataforma y taludes continentales (Duque-Caro, 1984; Molina, 1993).

4.2.1. Cinturón del Sinú: como se mencionó brevemente, este Cinturón posee mayor influencia geológica en el área de estudio y a diferencia del cinturón de San Jacinto, se pueden encontrar manifestaciones de diapirismo de lodo y rocas más jóvenes. Geológicamente se pueden destacar las siguientes formaciones (Ingeominas, 2010).

i. Formación Arjona (PgNga): aflora al norte de la población de Rocha. Su sedimentación corresponde a ambientes marinos someros tipo delta y su estratigrafía no está bien definida debido al alto grado de fallamiento relacionado principalmente al diapirismo de lodo. Las rocas de esta formación son lodolitas de color marrón y areniscas. Se estima que la edad de estas rocas es del Oligoceno Superior, sin embargo, Reyes et al. (2001) asigna una edad de Mioceno – Plioceno. Esta formación se encuentra en contacto inferior con la Formación San Cayetano (hace parte del Cinturón San Jacinto), y superior con la Formación Bayunca y La Popa.

ii. Formación Bayunca (Ngb): se observa al NE de Cartagena y está descrita como el resultado de sedimentación en zona intermareal, constando de areniscas de color gris de grano muy fino, estratificadas con lodolitas y limolitas

(Reyes et al., 1999). Su edad corresponde al Mioceno – Plioceno y se encuentra en contacto superior discordante con la Formación La Popa y Arroyo Grande.

iii. Formación Rotinet (Qpr): aflora el N de la población de Piedras, en Turbaco. Autores como Caro et al. (1985) sugieren un ambiente fluvial asociado a un antiguo delta del río Magdalena en el que se encuentran principalmente gravas con formas de canal y estratificación cruzada; tiene intercalaciones con areniscas cuarzosas de grano fino a medio. Su edad corresponde al Pleistoceno Medio – Superior y está en contacto inferior con la Formación San Cayetano, Hibácharo y Turbará.

iv. Formación Arroyo Grande (Qpag): se encuentra en la localidad de Arroyo Grande y se asume una influencia marina según Guzmán et al. (2004). Consta de un depósito de gravas y arenas y data del Pleistoceno.

Está en contacto inferior con la Formación Bayunca y se encuentra cubierta por depósitos cuaternarios.

v. Formación La Popa (Qpp): se puede encontrar principalmente en la Isla Barú, Tierrabomba, Bocachica y parte de la Bahía de Cartagena y está relacionada con un ambiente marino somero con influencia continental por el aporte de sedimentos terrígenos. El autor Bürgli (1957) sugiere que esta formación consta arcillas micáceas, arcillas arenosas, calizas amarillas con bloques de arrecifes coralinos, caliza porosa arrecifal y caliza maciza de arrecifes coralinos.

El espesor promedio de la formación es de 63 m. A pesar de que la edad de esta unidad ha sido muy controvertida, se ha estimado que es del Pleistoceno (Anderson, 1926; Barrera, 2001). Se encuentra en contacto inferior con la Formación Arjona y Bayunca, en algunos sectores.

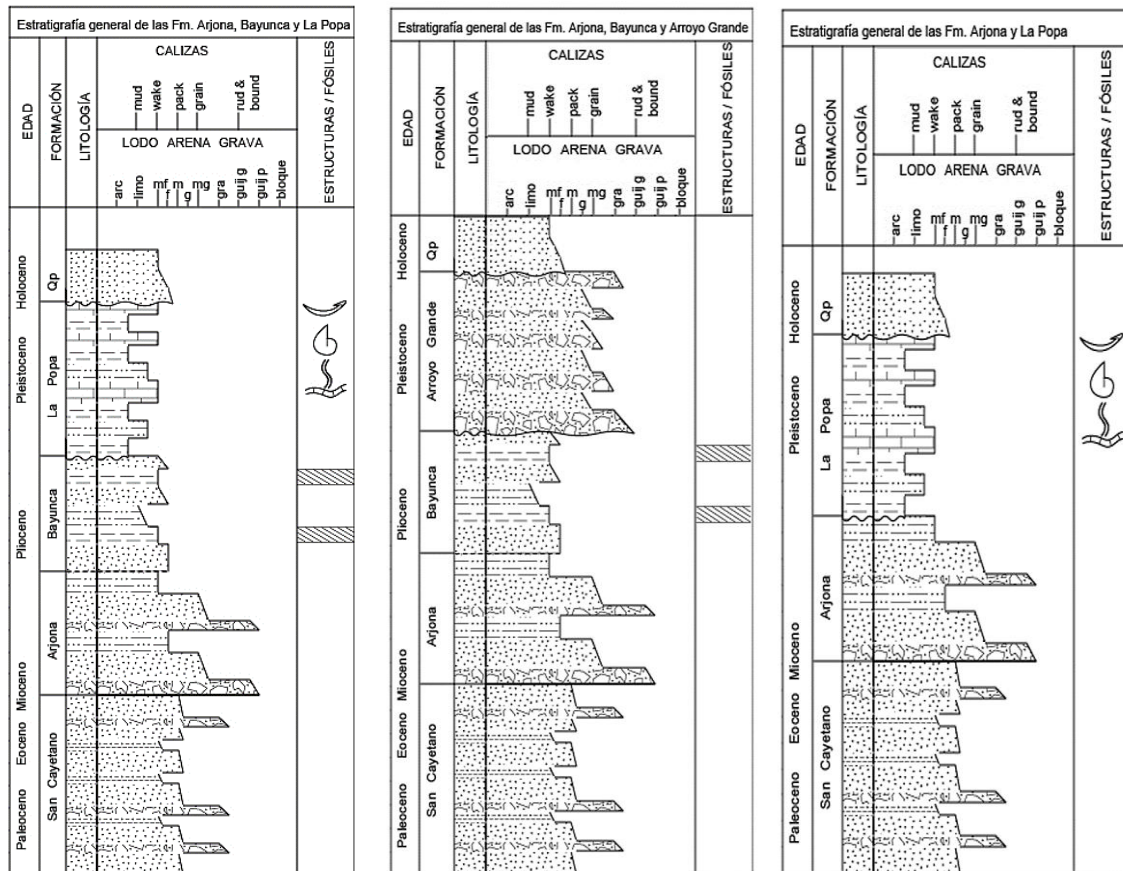


Figura 5. Columnas estratigráficas de las principales formaciones geológicas correspondientes al Cinturón del Sinú aflorantes en el área de estudio. Fuente: propia

4.2.2. Cinturón San Jacinto: se compone de formaciones de rocas sedimentarias, principalmente areniscas y lodolitas altamente deformadas debido a los esfuerzos compresionales (Duque-Caro, 1984; Vernet, 1989). Grosso modo, se pueden destacar las siguientes formaciones

i. **Formación San Cayetano (Pgsc):** aflorando al noreste de Galerazamba, consta de areniscas líticas feldespáticas de grano fino, localmente con niveles conglomeráticos e intercalaciones de lodolitas en capas delgadas con abundante yeso y azufre. Se ha sugerido que su edad es del Paleoceno Superior a pre-Eoceno Medio (Clavijo y Reyes, 1996).

ii. **Formación Pendales (Pgp):** se observa al noreste de la ensenada de Galerazamba y los afloramientos pueden encontrarse a lo largo de la línea de costa.

Compuesta por areniscas de grano grueso a medio, generalmente conglomeráticas interestratificadas con arcillolitas y limolitas. Henao (1951) planteó una edad Oligoceno Medio para esta formación, sin embargo, Ingeominas (2010) la cartografió como Eoceno.

iii. Formación Arroyo de Piedra (Pga): Bueno (1970) la describe como una formación que se encuentra en la población de su mismo nombre. Corresponde a una serie calizas fosilíferas que afloran en los flancos del anticlinal de Luruaco, en su parte norte. Se pueden observar, además, calizas de algas rojas y lodolitas calcáreas con laminación paralela (Ingeominas, 2010). Su edad corresponde al Eoceno Medio – Tardío (Reyes y Zapata, 2001).

iv: Formación Las Perdices (PgNgp): aflora al norte de la Ciénaga de el Totumo, al noreste de Galerazamba y al sur de Puerto Colombia. Se compone de lodolitas grises intercaladas con areniscas de grano fino (Ingeominas, 2010). Su edad corresponde al Oligoceno Superior - Mioceno Inferior.

v. Formación Hibácharo (Ngh): aflora en Las Lomas de San Diego y San Vicente principalmente, además, se puede observar en Cerro Mahates. Consta de limolitas negras carbonosas, lodolitas grises y amarillas, areniscas de grano fino y esporádicos niveles bioclásticos (Ingeominas, 2010). La edad que se le asigna a esta formación es del Mioceno Medio – Superior (Barrera, 2001).

vi. Formación Turbará (Ngt): aflorando principalmente en la línea de costa, se compone de areniscas de grano fino a grueso, cuarzosas y algunas calcáreas intercaladas con lodolitas grises a negras. Su edad es Mioceno Superior – Plioceno.

Finalmente, en el área de estudio se pueden encontrar depósitos cuaternarios coluvio-aluviales, de llanura de inundación, eólicos y fluviolacustres. Igualmente se incluyen los depósitos de flujo de lodo, producto de la emanación y erupción de los “volcanes de lodo” presentes en las formaciones que hacen parte del cinturón del Sinú (Ingeominas, 2010).

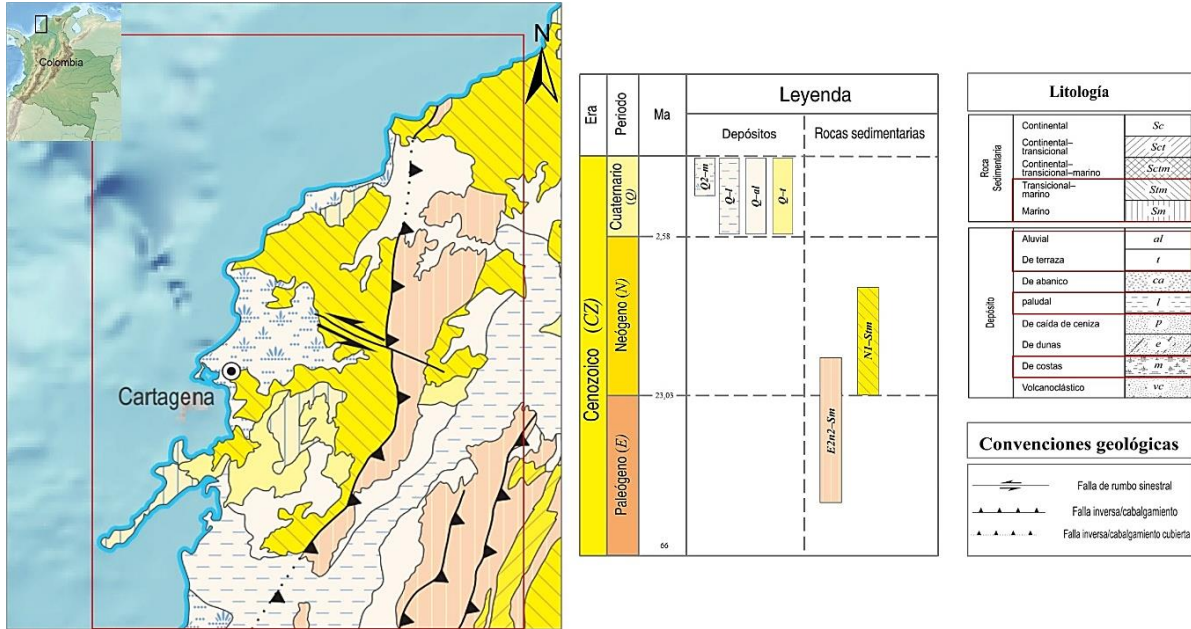


Figura 6. Mapa geológico general de la zona de estudio tomado y modificado del Mapa Geológico de Colombia (SGC, 2019) escala 1:2.000.000. Nótese la edad de las rocas que corresponden principalmente a las formaciones del Cinturón del Sinú. Formaciones geológicas relacionadas a rocas sedimentarias de ambiente Transicional Marino: Bayunca (Ngb); relacionadas a ambiente Marino: Hibácharo (Ngh) y Turbará (Ngh); relacionadas a depósitos cuaternarios: Rotinet (Qpp), Arroyo Grande (Qpag) y La Popa (Qpp).

4.3. Geología estructural

Como se mencionó anteriormente, Cartagena y las zonas más próximas, están afectadas principalmente por el Lineamiento del Sinú. Además, tiene control estructural por plegamientos, fallas, pliegues y diapiros de lodo (Duque-Caro, 1979) (ver figura 7).

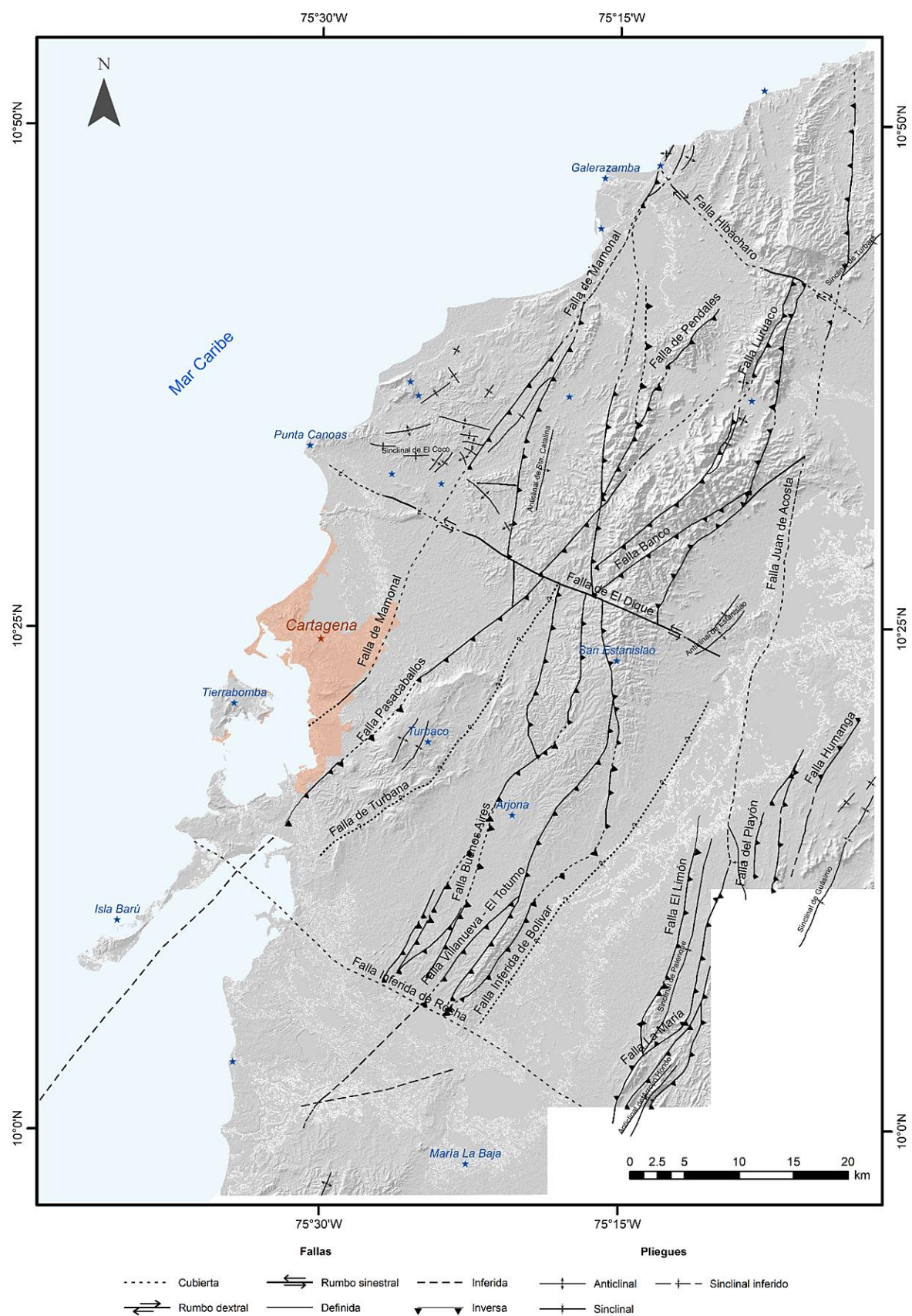


Figura 7. Mapa estructural generalizado con las principales fallas y pliegues de la zona de estudio. Se observa que las fallas inversas o de cabalgamiento son las más comunes. Fuente: propia sobre mapa base de ArcGIS y planchas geológicas del Servicio Geológico

De forma local se encuentran nueve fallas principales que cruzan el área de estudio, tal como se resume en la tabla 1:

Tabla 1. Principales fallas de la zona de estudio.

Nombre	Tipo de falla	Descripción	Rumbo, buzamiento y extensión
Villa Nueva - El Totumo	Inversa de cabalgamiento	Afecta las Fm. Arjona San Cayetano. Falla inversa de Cabalgamiento	Rumbo N40°E Buzamientos 45° - 50° Extensión 75 km
Buenos Aires	Inversa	Afecta la Fm Arjona atravesando las planchas 23 y 29-30. Falla inversa.	Rumbo N30°E Buzamiento de 60° E. Extensión 42 km
Quita Calzón	Inversa de cabalgamiento	Afecta la Fm. Arjona. Constituye un ramal de la Falla Buenos Aires, y es de tipo cabalgamiento.	Rumbo N50°E Buzamiento 45° Extensión 8 km.
Casaloma	Inversa	Se presenta en las planchas 29-30. Es un ramal de la Falla Buenos Aires de tipo inversa.	Rumbo N30°E Buzamiento 45° - 50° E Extensión 20 km
Turbaná	Inversa de cabalgamiento	Afecta las Fm. Rotinet y La Popa. Falla inversa con evidencias de cabalgamiento (Ingeominas, 2001)	Rumbo N45°E Buzamiento 40° E Extensión 35 km
Pasacaballos	Inversa de cabalgamiento	Afecta las Fm. Bayunca, La Popa y Rotinet. Es una falla inversa de cabalgamiento.	Rumbo N50°E Buzamiento 50° E Extensión 57 km
Mamonal	Inversa de cabalgamiento	Pone en contacto fallado a las Fm. La Popa y Bayunca, también afecta la Formación Rotinet. Es una falla inversa de cabalgamiento.	Rumbo N50°E Buzamiento 50° - 60° E Extensión 60 km
Del Dique	Rumbo con movimiento lateral izquierdo	Autores como Reyes et al. (1999) afirman que produce el desplazamiento de la falla Villa Nueva - El Totumo en el sector de Villa Nueva (en el departamento de Bolívar).	Rumbo N60°W Extensión 50 km
Cuatro Caminos	Inversa	Se encuentra en contacto con la Falla Turbaná y afecta las rocas de la Fm. Arjona (Reyes et al., 1999)	Rumbo N-S Buzamiento35° - 40° E Extensión 16 km

Los plegamientos que dominan la zona son:

- Plegamiento de Turbaco, conformado por anticlinales y sinclinales cortos y estrechos, extendiéndose a lo largo de 7 km con dirección N30°E en el área de Turbaco.
- Plegamiento de Barú, conformado también por sinclinales y anticlinales cortos y estrechos de ángulos entre 10 y 15°. Este plegamiento involucra las formaciones Rotinet y La Popa (Reyes et al.,1999) y se extiende a lo largo de 2,5 km en el área de Barú con dirección N50°E.

Finalmente, se observan el Sinclinal El Coco y el Anticlinal de Santa Catalina. Sus núcleos se encuentran conformados por rocas de la Fm. Arjona y sus ejes son asimétricos (Reyes et al., 1999). El Sinclinal El Coco, posee una disposición radial y está relacionado a eventos diapíricos que han actuado desde del Mioceno Superior (Reyes et al., 2001); su rumbo es E-W y se extiende por 2.5 km.

El Anticlinal de Santa Catalina tiene un rumbo N10°E y su extensión de 7,5 km.

4.4. Geomorfología

La zona de estudio corresponde en primer lugar a morfoestructuras que corresponden al Sistema Orogénico Costero, que involucra las provincias geomorfológicas de los Cinturones de Sinú y San Jacinto (INGEOMINAS, 2010). Hay que tener en cuenta que el Cinturón de Sinú tiene una edad, grado de plegamiento y nivel de elevación menor que el de San Jacinto, además, como se mencionó en el capítulo de geología, está afectado por fenómenos de diapirismo de lodo que determinan la morfología y dinámica del terreno (INGEOMINAS, 2010).

Para la caracterización geomorfológica en la zona de estudio, es necesario recurrir al esquema de jerarquización propuesto por Carvajal (2008), con fuentes de Velásquez (1999) como se observa en la figura 8, y está distribuida de la siguiente forma:

- Geomorfoestructura: Sistema Orogénico Andino Costero y Márgenes Continentales
- Provincia: Cinturones de Sinú y San Jacinto.
- Región: ambientes morfodinámicos presentes como estructural, denudacional, marino - costero y en menor medida, fluvial y lagunar.
- Unidad: sierras denudacionales, cerros residuales, terrazas fluviales, terrazas marinas o deltas. El alcance de este trabajo será hasta este ítem)

Esquema de caracterización geomorfológica

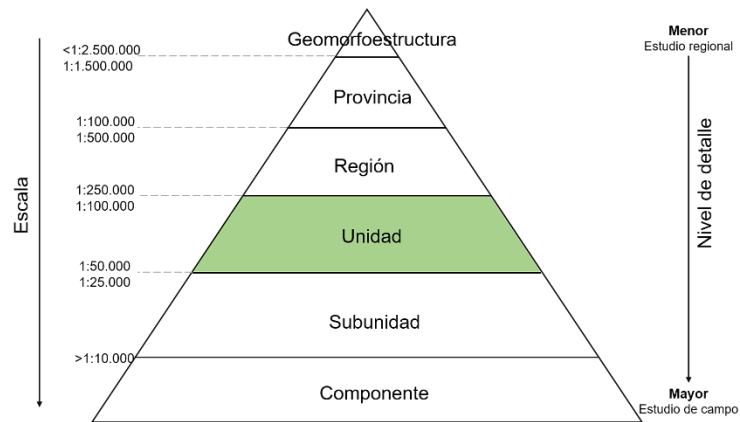


Figura 8. Esquema de caracterización geomorfológica según la escala. Adaptado de Ingeominas (2000)

El ambiente morfodinámico estructural – denudacional estudia las regiones que están relacionadas con la geodinámica interna que ha contribuido a la disposición actual del territorio. En este caso, se asocia al acrecimiento de los Cinturones Sinú y San Jacinto como consecuencia de la convergencia entre placas y corresponde a serranías estructurales y tectónicas de baja altura. Este ambiente ha estado asociado a levantamientos, plegamientos, fallamientos intensos y diapirismo de lodo, que generan deformación principalmente vertical.

El ambiente morfodinámico denudacional se asocia principalmente al clima semiárido de la región, que ha contribuido a la erosión de las morfoestructuras iniciales, generando formación de planicies, lomeríos y colinas de baja altura. En este tipo de ambientes predominan los procesos de remoción y disección de materiales por corrientes aluviales.

Se observa también el ambiente morfodinámico marino - costero, donde la acción del oleaje en la zona litoral modela el paisaje, configurando los avances y retrocesos de la línea de costa. Las planicies costeras son la geoforma más común de este tipo de ambientes, que se forman no solo por la erosión, sino también por la acumulación de sedimentos; se presentan además llanuras costeras, tómbolos y espigas.

Finalmente, en la zona se encuentra el ambiente morfodinámico fluvial y lagunar, que está presente en menor medida y se da debido a que las corrientes fluviales transportan material detrítico y facilitan su rápida deposición. Este proceso permite la formación de planicies fluviales y terrazas de inundación.

Es importante, además, considerar el ambiente antropogénico, ya que las actividades humanas constantemente ejercen una influencia en el modelamiento del paisaje. Entre las intervenciones se destacan las planicies afectadas en los sectores del Canal del Dique y Pueblo Nuevo, adicionalmente, se observan los pequeños embalses generados por los habitantes de la región para proveer agua en época seca a Santa Catalina, Turbaco y Cañaveral.

Estos ambientes se resumen en la figura 9, donde los colores de tonalidad púrpura corresponden al ambiente estructural; en tonos azul, ambientes fluviales y lagunares; en verde, ambientes marinos y costeros; en tonos ocre, ambiente denudacional, y finalmente, en tonos marrón, ambiente antropogénico.

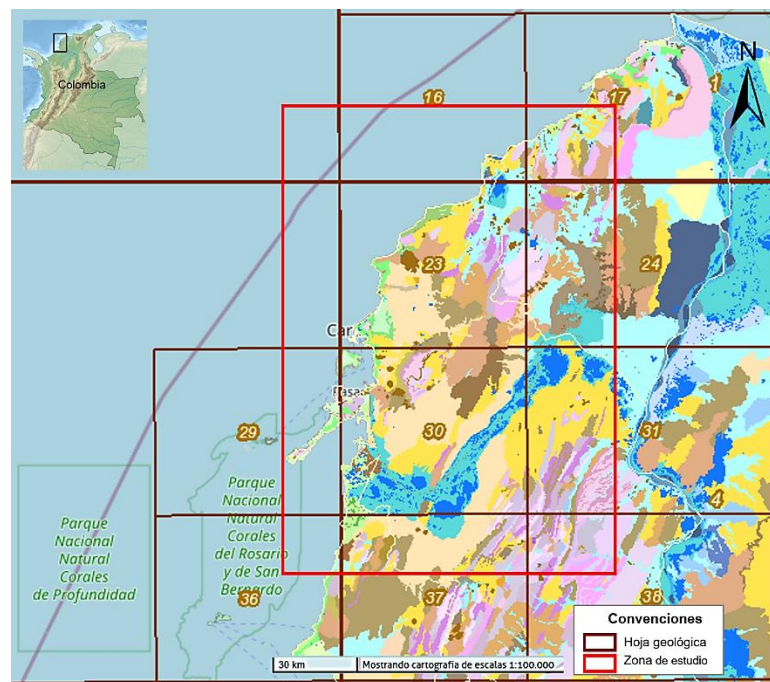


Figura 9. Mapa geomorfológico general de la zona. La escala es 1:100 000 y se alcanzan a apreciar algunas unidades. Tomado y modificado de Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA)

5. Marco teórico

El diapirismo de lodos es conocido como un proceso de empuje de materiales finos y características plásticas presurizados en profundidad, que migran desde zonas de grandes presiones a zonas de baja presión por el efecto de la diferencia de densidades entre estos materiales y la cobertera superior. La movilización de los materiales diapíricos es inducida igualmente por el contenido de gases (metano), compresión lateral en zonas de tectónica convergente y procesos de deshidratación de arcillas (Kopf, 2002).

El término “diapiro” se aplica a estructuras que se originaron o parecen haberse originado como resultado de movimientos de materiales caracterizados por poseer baja viscosidad y densidad. Los materiales diapíricos más comunes son las evaporitas (halita, silvita, yeso y anhidrita), shales no compactados y lodos bajo condiciones de alta presión (O’Brien, 1968). Según Kopf (2002), estos procesos se manifiestan en el registro sedimentario como cuerpos arcillosos que “intruyen” rocas preexistentes y localmente salen a superficie.

Cuando estos materiales se emplazan en las rocas y deforman la secuencia suprayacente sin salir a la superficie, se denominan “diapiros de lodo”, mientras que cuando los materiales diapíricos salen a través de fracturas o fallas hacia la superficie, se denominan “volcanes de lodo” (figura 10). Es entonces que el “volcanismo de lodo” se puede considerar geológicamente como una manifestación en superficie del diapirismo (Giraldo et al., 2012).

En resumen, este fenómeno ha sido definido como el proceso en el cual materiales profundos de constitución predominantemente arcillosa, se emplazan en rocas de niveles superiores (Duque-Caro, 1984) y se exponen eventualmente a la superficie.

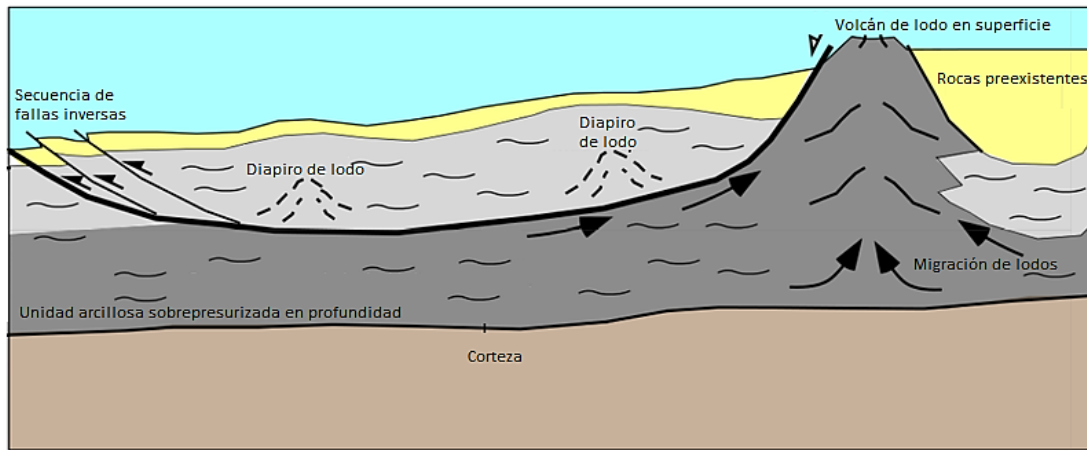


Figura 10. Migración de lodo generando diapirismo y emplazamiento en rocas preexistentes. Eventual manifestación en superficie conocida como volcanes de lodo. Tomado y modificado de Giraldo et al., 2012

Los procesos diapíricos se relacionan al origen de una secuencia de arcillas marinas depositadas rápidamente, ya que los volcanes de lodo ocurren a lo largo de márgenes de placa convergentes donde se acumulan sedimentos ricos en fluidos de aguas profundas y estos depósitos posteriormente ingresan a la zona de subducción, donde los líquidos y volátiles se liberan debido al aumento de la compactación generada por esfuerzos y la temperatura (Kopf, 2002).

6. Antecedentes

6.1. Diapirismo de lodo en el mundo

Globalmente se encuentra el fenómeno de diapirismo se encuentra tanto en sobre el continente, como en el mar.

La figura 11 resume los países en los que el fenómeno de diapirismo está asociado a prismas acrecionarios como se observa en Barbados, Costa Rica, Panamá, Japón, Mar Mediterráneo y Mar Egeo. En contextos continentales se han reportado ocurrencias en Indonesia, Lago Michigan, Texas, Lousiana, Mississippi y Trinidad y Tobago. Por último, se han encontrado ejemplos adicionales en las costas

de California, Armenia, Groenlandia, Golfo de Cádiz, Países Bajos, Norte de Italia, Marruecos, Egipto y Tanzania, donde se ha demostrado la asociación de volcanes de lodo con fumarolas de gas, emanaciones de crudo, y con la presencia subsuperficial de hidratos de gas como resume González (2005).

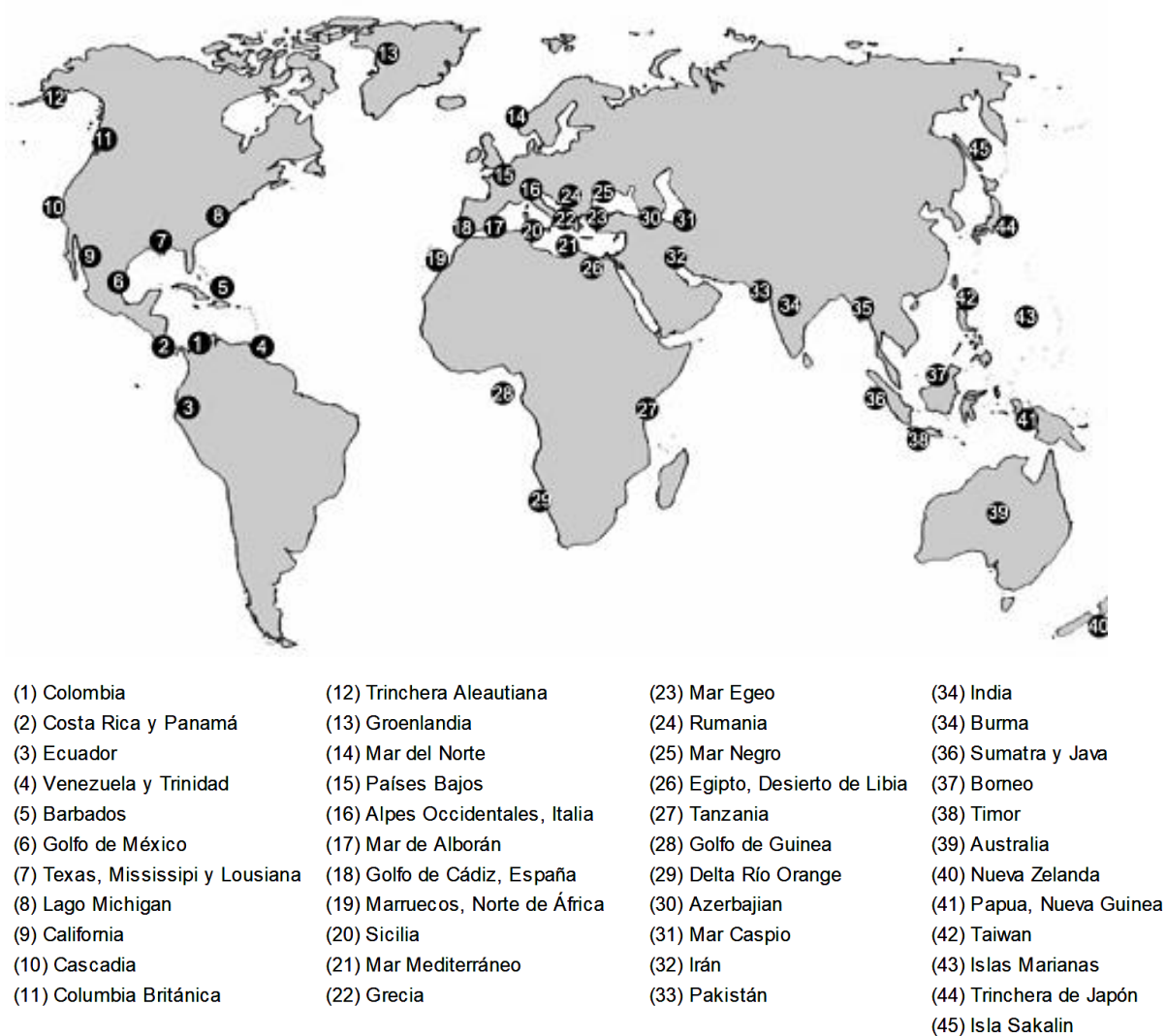


Figura 11. Principales localidades mundiales donde se ha reportado el fenómeno de diapirismo y volcanismo de lodo. Adaptado y modificado de Kopf, 2003 en González y Rodríguez, 2005

6.2. Diapirismo de lodo en el Caribe Colombiano

En el margen continental colombiano se ha documentado la presencia de diapirismo arcilloso, siendo este fenómeno particularmente evidente en el Cinturón de Sinú. Autores como Duque-Caro (1979, 1984), Briceño et al. (1992), Carvajal (2016, 2017), Vernet (1989, 1992, 2012) y Reyes (1999, 2001) han estudiado el fenómeno del diapirismo de lodo en la zona costera del Mar Caribe, concluyendo que puede presentarse tanto en las zonas emergidas como en áreas de costa afuera del mar, generando expresiones geomorfológicas como lo son domos, colinas, islas de arrecifes de coral y volcanes de lodo.

Duque-Caro (1984) y Vernet (1989), además, han investigado cuál ha sido la relación con la geomorfología actual del terreno, el comportamiento de la línea de costa debido a estos procesos y las amenazas que puedan presentarse. Finalmente, estos autores concluyen que el diapirismo de lodo es el factor deformante más importante en el Cinturón del Sinú atribuyendo el fenómeno a la inversión de densidad y compresión vertical, tendencia del lodo a migrar hacia los pliegues anticlinales y a la tendencia que tiene el lodo de viajar a través de los planos de falla.

Entre las manifestaciones más comunes se encuentran las ubicadas en los departamentos de Antioquia y Córdoba y algunos de los ejemplos mejor conocidos son los volcanes de lodo de San Antero (Córdoba), Arboletes (Antioquia), Alto de Mulato (Antioquia) y el volcán de lodo de Cacahual (Antioquia) (ANH, 2008; Vernet, 2003). Igualmente se han encontrado manifestaciones diapíricas submarinas en la isla frente a Damaquiel (Antioquia).

En los alrededores de Cartagena, se observan los volcanes de lodo de Turbaco, Ternera, Mamonal, Cañaveral, Bayunca, Lomita Arena y El Totumo, los cuales se encuentran hacia el Norte de la ciudad en zonas emergidas (Reyes et al., 2001), además, se pueden encontrar manifestaciones mínimas en las islas de arrecifes de coral del Rosario, Tierrabomba y Barú (Bolívar) (Vernet, 1985-89 y 2003).

Para el caso del área de estudio, Carvajal (1996) y Reyes et al. (2001) sugieren que el diapirismo de lodo comenzó desde el Plioceno – Pleistoceno superior y se sigue presentando en la actualidad. Sin embargo, no se espera encontrar registros o evidencias de volcanes de lodo que no daten del Holoceno, debido a la fuerte morfodinámica denudacional que se presenta en la zona.

Es importante entender el comportamiento diapírico e identificar en qué lugares se encuentran los volcanes de lodo, ya que las amenazas más probables relacionadas con eventuales explosiones según Barrera (2001) son:

- Expulsiones violentas de gases inflamables
- Lanzamiento de bloques
- Incendios
- Flujos de lodo
- Hundimientos (subsistencia)
- Levantamientos
- Fracturamiento del terreno alrededor de los conos
- Cambios en la línea de costa (Carvajal et al., 2016)

Los volcanes y principales manifestaciones de lodo presentes en el área de estudio, descritos por Carvajal y Mendivelso (2017) son:

6.2.1. Volcán de lodo Galerazamba: se encuentra en el municipio de Galerazamba, en el departamento de Bolívar, localizado al costado oriental del casco urbano. Es una estructura cómica de 10 a 15 m de altura, y un cráter de aproximadamente 60 m de diámetro.

Sus costados están cubiertos por vegetación y hacia el NW se presentan aproximadamente siete manaderos de 10-50 cm de diámetro.



Figura 12. A la izquierda, manadero del Volcán de lodo Galerazamba. Tomado de Germán Gómez, tomado del periódico El Universal (2012). A la derecha, manadero en la cima NW del volcán. Tomado de Carvajal (2017)

6.2.2. Volcán de lodo Las Palomas: ubicado en el municipio de Galerazamba a 1,5 km al SE del casco urbano. Esta estructura tiene forma de domo, de 25 a 30 m de altura y 850 m de diámetro. En la parte de la estructura, donde además se evidencian 30 – 40 bocas por donde emanan lodos, se encuentra un cráter de 180m de diámetro (figura 13a).

6.2.3. Volcán de lodo Pueblo Nuevo: también llamado Volcán Los Olivos, se encuentra ubicado en el corregimiento de Pueblo Nuevo, en el municipio de Santa Catalina, corresponde a una estructura cómica con 1500 m de diámetro y 50 m de altura. Presenta un cráter de 100 m de diámetro, con 16 bocas activas. Su última emanación se registró el 27 de abril de 1999 hacia el costado NW se las laderas del volcán (figura 13b).

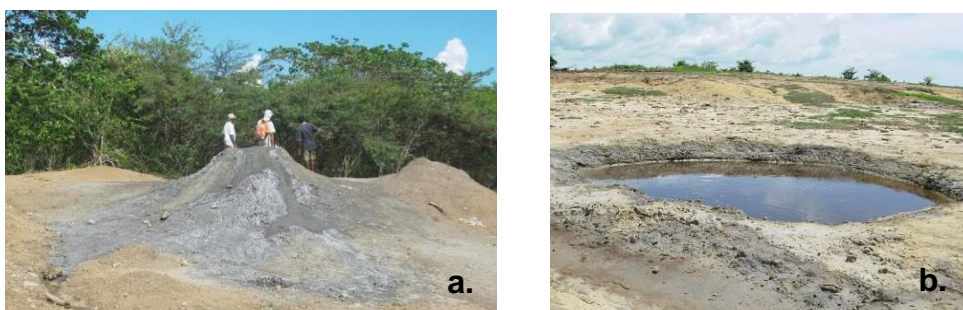


Figura 13a. Vista hacia el E de los manaderos presentes en el cráter del volcán Santa Catalina. Tomado de Carvajal (2017). **Figura 13b.** Cráter de Volcán de lodo Las Palomas. Tomado de Carvajal (2017)

6.2.4. Volcán de lodo El Totumo: se encuentra ubicado entre los departamentos de Bolívar y Atlántico, al oriente del corregimiento de Pueblo Nuevo. Tiene entre 800 y 1000 m de diámetro, y 25 m de altura. En la cima se encuentra un cráter con 25 a 30 m de diámetro, donde se observan 10 bocas de 10 a 50 cm de diámetro.

Este volcán es una de las atracciones turísticas de la región y uno de los más grandes que se han reportado hasta el momento. Su última erupción ocurrió el 23 de agosto de 2000.



Figura 14. Volcán de lodo El Totumo. Se observa la estructura principal del manadero del principal volcán de lodo turístico del departamento de Bolívar. Tomados de El Universal (2014)

6.2.5. Volcán de lodo La Bonga: se encuentra a 2500 m de la localidad Lomita Arena, municipio de Santa Catalina, en el departamento Bolívar. Corresponde a una estructura en forma de domo de 850 m de diámetro y 45 m de altura y presenta tres bocas de manaderos activos de 0,5 a 1,5 m de diámetro.



Figura 15. Vista hacia el SE de la estructura volcánica de lodo La Bonga. Tomado de Carvajal (2017)

6.2.6. Volcán de lodo Yerbabuena: este volcán de forma cómica se encuentra al norte de la localidad de Ponce de León (Bolívar). Tiene 4500 m de diámetro y una altura promedio de 75 m, con 193 bocas cuyos diámetros oscilan entre 20 y 50 cm. Se identificaron cuatro flujos de 1 a 2 km de longitud por los sectores N y E de la estructura.



Figura 16. Manaderos del Volcán de lodo Yerbabuena. A la izquierda se observan algunos flujos de lodo y grietas de desecación. A la derecha, detalles de uno de los manaderos del volcán de lodo. Fotografías tomadas por Lyda Pinzón, 2008. Obtenidas de Carvajal (2017)

6.2.7. Volcán de lodo El Reposo: se ubica en el municipio de Cartagena de Indias, a 4 km al N de Bayunca. Tiene aproximadamente 2100 m diámetro y 40 – 60 m de alto. Este volcán posee al menos 25 bocas con alturas de 60 a 100 cm y diámetros de 20 a 60 cm, distribuidas en un cráter de 300 m de diámetro. Su última erupción se reportó el 11 de mayo de 2012.



Figura 17. Bocas en el cráter del volcán de lodo El Reposo. Fotografías tomadas por Henry Carvajal, 1996. Obtenidas de Carvajal (2017)

6.2.8. Volcán de lodo El Rodeo: este volcán se encuentra al SE de Cartagena de Indias, en el departamento de Bolívar. Está constituido por dos zonas cóncavas, con diámetro promedio de 1200 m y altura de 60 m; en la cima principal está situado un cráter de 300 m de diámetro donde se encuentran aproximadamente 60 bocas con diámetros de 20 – 60 cm. Los últimos eventos eruptivos que se reportaron fueron dos, uno a finales de 2012 y el otro el 17 de febrero de 2013.

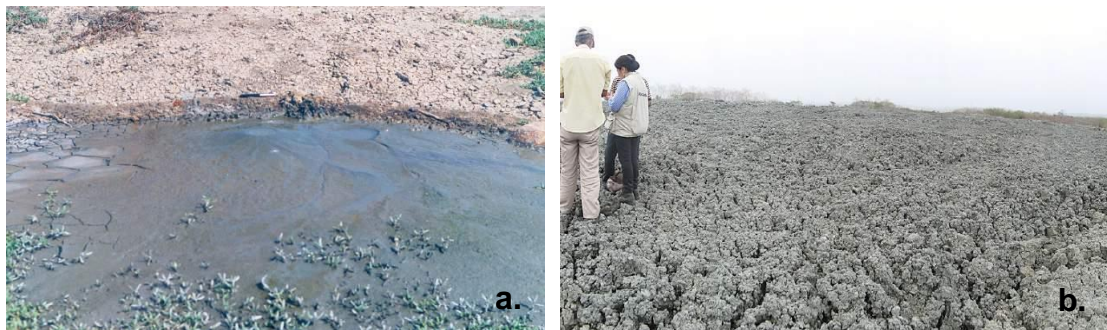


Figura 18a. Detalles de uno de los manaderos del Volcán de lodo El Rodeo. Fotografía tomada por Henry Carvajal, 1996. **Figura 18b.** Flujos de lodo emitidos por el volcán de lodo a finales de 2012. Fotografía tomada por Henry Carvajal, 2013

6.2.9. Volcán de lodo Membrillal: localizado en el municipio de Turbaco, tiene una estructura en forma de domo de 800 – 100 m de diámetro de 20 a 25 m de altura. Las bocas tienen de 10 a 30 cm de diámetro y se pueden encontrar cerca de las viviendas de la zona, donde los habitantes conviven con este fenómeno (figura 19).

6.2.10. Volcán de lodo Cañaveral: localizado a 1 km al NW del casco urbano del municipio de Cañaveral, en el departamento de Bolívar. Se observa la colina en forma de domo de 60 m de altura y 1600 m de diámetro. Presenta un cráter de 500 m diámetro y en su interior se encuentran cuatro manaderos en forma de cono de 2 a 6 m de diámetro y 2 a 3 m de altura, con bocas de 10 a 60 cm (figura 20).



Figura 19. Aspecto de una de las bocas del volcán en el barrio Membrillal en cercanías a viviendas. A la izquierda, fotografía tomada por Gloria Obando, 2013. A la derecha tomada del periódico RCN Radio, 2016



Figura 20. Manadero principal del volcán de lodo Cañaveral. Fotografía tomada por Henry Carvajal, 2008

6.2.11. Volcán de lodo Turbaco: localizado a 5,3 km al E del casco urbano de Turbaco, la región es conocida como “La Loma de los Volcanes”. Tiene un 1 km de diámetro y 50 m de altura, en cuya cima se encuentran aproximadamente 130 bocas de forma circular y cónica de hasta 60 cm de altura. Es uno de los volcanes de lodo más activos de la zona.



Figura 21. Emanaciones del Volcán de lodo de Turbaco. Fotografías tomadas por Lyda Pinzón, 2008

6.2.12. Volcán de lodo Santa Catalina: localizado al NW del casco urbano de Santa Catalina en el departamento de Bolívar. Este volcán se encuentra de forma cómica, de 600 a 1000 m de diámetro en la base y 40 m de altura. Presenta aproximadamente 12 bocas con diámetro que oscilan entre 10 y 30 cm distribuidas en un cráter de 150 m de diámetro (figura 22).

6.2.13. Volcán de lodo Clemencia: localizado al S de Santa Catalina y a 2 km del casco urbano de Clemencia, corresponde al anticlinal de Clemencia. Tiene forma cómica de 700 m de diámetro en la base y 50 m de altura. Presenta un cráter de 200 m de diámetro en la cima de la estructura cónica donde se encuentran de 5 a 10 bocas de 20 a 80 cm de altura (figura 23).



Figura 23. Bocas de 15 a 20 cm de diámetro en el volcán de lodo Santa Catalina. Fotografía tomada por Henry Carvajal, 2009



Figura 22. Vista de manaderos de lodo en el sector Caracolí, en el municipio de Clemencia. Fotografía tomada por Carmen Castiblanco, 2009

6.2.14. Volcán de lodo Flamenco: localizado en el corregimiento de flamenco, municipio de María la Baja, en el departamento de Bolívar. Tiene forma cómica, con aproximadamente 1 km de diámetro en la base y 50 m de altura. Este volcán tiene tres bocas activas con diámetros de 30, 40 y 80 cm por las cuales se emana lodo en el costado SW de la estructura.



Figura 24. Detalle de las bocas del volcán Flamenco y aspecto de los flujos de lodo procedentes de los manaderos. Los flujos más antiguos tienden a tornarse de color amarillento. Fotografías tomadas por Domingo Mendivelso, 2008

6.2.15. Volcán de lodo La Lomita: localizado en la finca Loma Bonita en el municipio de María La Baja, en el departamento de Bolívar. Esta estructura tiene 1100 m de diámetro en la base y 35 m de altura.

Presenta un cráter de 190 m de diámetro, con 26 bocas activas que pueden formar estructuras cónicas de varios centímetros hasta 2 metros de altura, y diámetros desde 10 hasta 80 cm.



Figura 25. A la izquierda, manadero del volcán de lodo La Lomita. A la derecha, detalles de las bocas de los manaderos de lodo. Fotografías tomadas por Domingo Mendivelso, 2008

6.2.16. Volcán de lodo La Laguna: este volcán se encuentra en el departamento de Atlántico, en la finca La Laguna a 3 km al SW de la población de Puerto Colombia. El volcán presenta una estructura cómica de 300 a 400 m de diámetro y alturas de 25 a 30 m. En la cima se observan tres bocas activas: una de 80 cm, otra de 40 cm y la más pequeña de 30 cm de diámetro.

6.2.17. Volcán submarino de Galerazamba: se localiza aproximadamente a 6 km al W del casco urbano de Galerazamba. Se caracteriza por la formación de una isla que meses después desaparece. Los eventos eruptivos se manifiestan con la ignición de gas metano y la generación de fuego.

4.2.18. Volcán submarino Punta Canoas: ubicado a aproximadamente a 3,5 km al SW del casco urbano de Punta Canoas. Su última erupción se registró en diciembre de 1979, generando fuego y la formación de una isla.

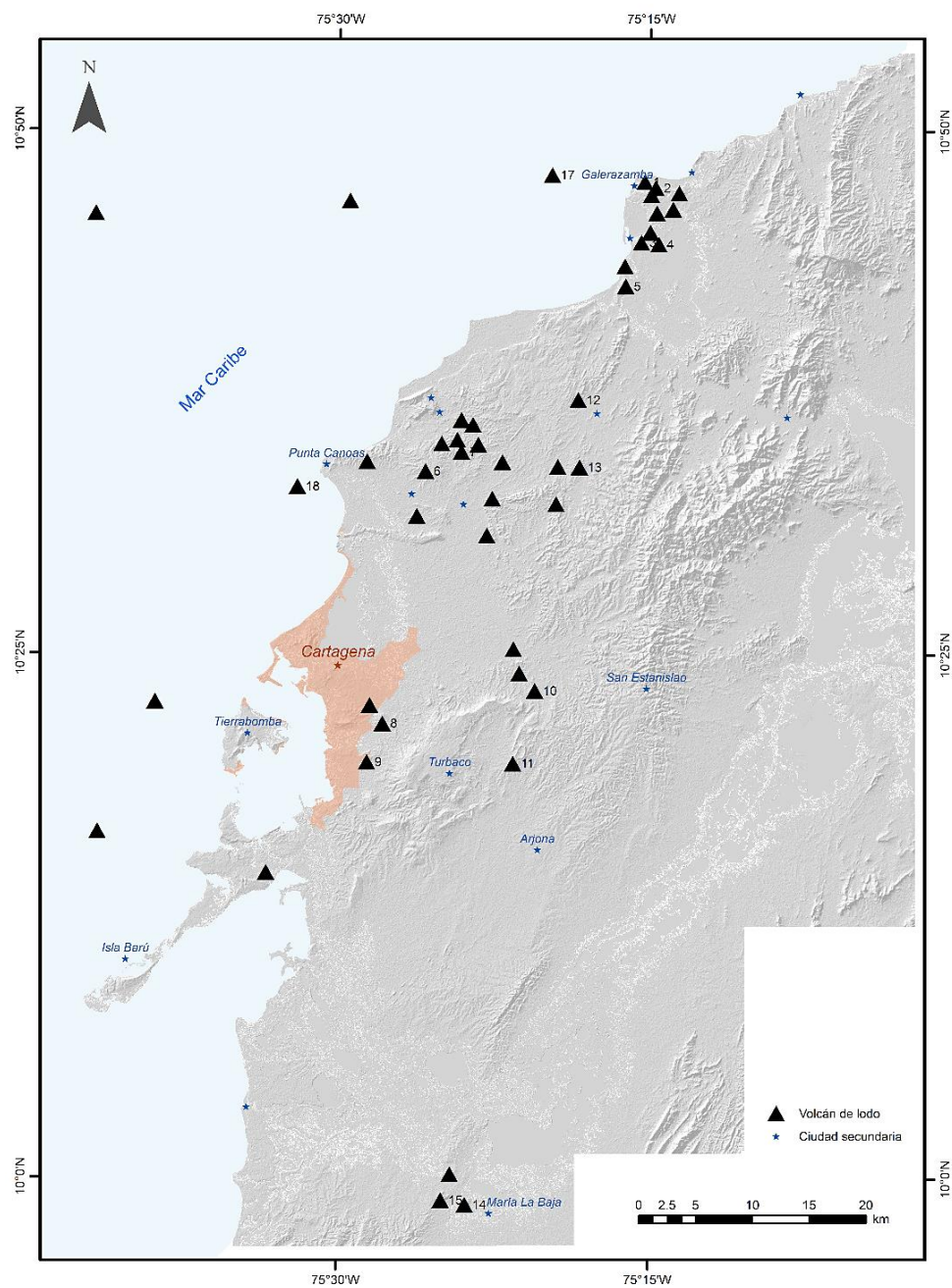


Figura 26. Distribución espacial de los volcanes de lodo de la zona de estudio. El número corresponde a los volcanes descritos anteriormente. Fuente: propia. Las coordenadas de los volcanes se extrajeron a partir de Carvajal (2017)

7. Metodología aplicada

En la figura 27 se muestra el procedimiento metodológico para el cumplimiento de los objetivos y se dividió en ocho fases.

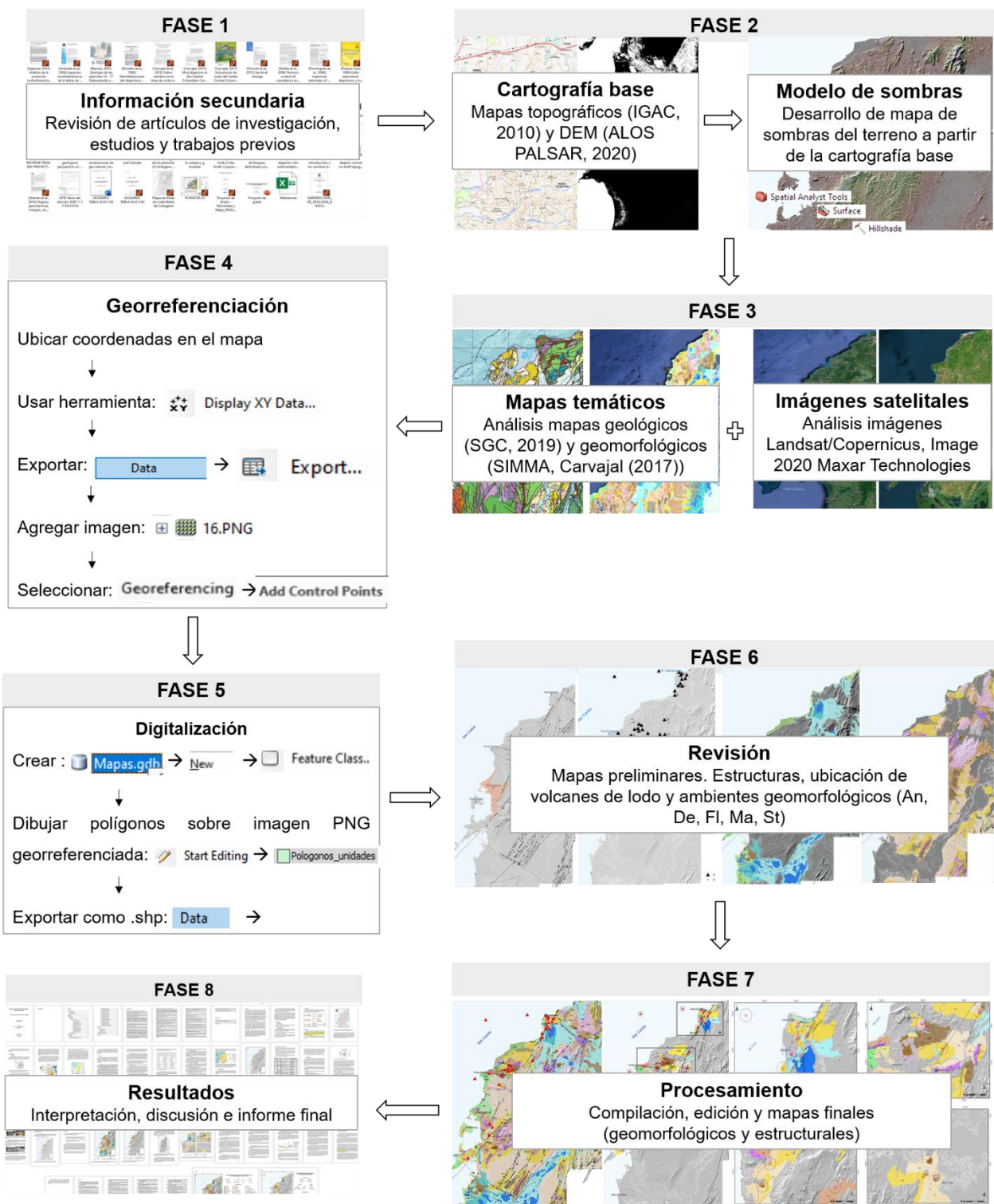


Figura 27. Flujograma metodológico utilizado para el desarrollo del trabajo

Para la realización de estos mapas, la información estructural como fallas y pliegues, fue obtenida de las planchas geológicas 1:100.000 mencionadas en el capítulo de Localización y, las unidades geomorfológicas, fueron identificadas y digitalizadas a partir de la información del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), mapas base del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Agámez (2011) y Carvajal (2017). El modelo de Elevación Digital (DEM) fue suministrado por el satélite ALOS PALSAR, y a partir de este se obtuvo el modelo de sombras con una resolución espacial de 12,5 m.

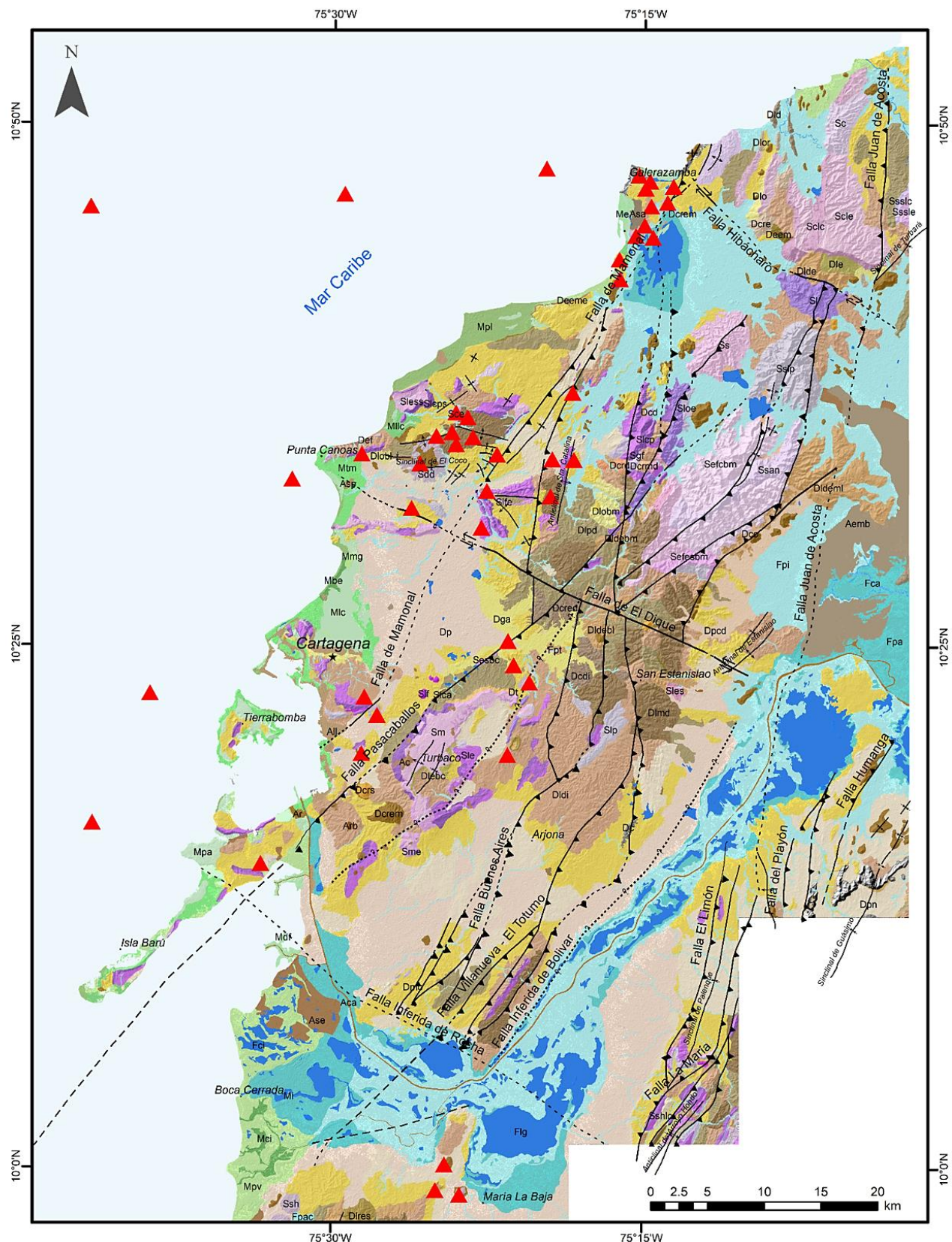
Adicionalmente, la información de los volcanes de lodo que se encuentran dentro de la zona de estudio se extrajo de Carvajal (2017) y Carvajal y Mendiavelso (2017). De estos estudios se utilizó la información correspondiente a:

- Coordenadas: se transformaron del Sistema de Coordenadas Colombia Magna Bogotá al sistema de coordenadas geográficas WGS 1984.
- Dimensiones de los volcanes de lodo: se obtuvo la descripción del diámetro y altura de las estructuras, esto con el fin de determinar la posible área de influencia sobre las unidades geomorfológicas que se encuentran ubicadas alrededor.

8. Resultados

En esta sección son presentados los resultados que constan principalmente de dos mapas. Los productos cartográficos elaborados son:

- Mapa de distribución espacial de los volcanes de lodo y las principales estructuras y unidades geomorfológicas del área de estudio (figura 28). En este mapa pueden observarse las principales estructuras geológicas tales como fallas y pliegues (anticlinales y sinclinales), destacándose de estos el Sinclinal del Coco y el Anticlinal de Santa Catalina.
- Mapa de área de influencia diapírica y estructural sobre unidades geomorfológicas en un radio de 500 m (nombrada área del volcán) y a 1000 m (nombrada área de influencia) (figura 29).



Convenciones			Ambiente geomorfológico				
▲ Volcán de lodo	↔ Rumbo sinistral	Pliegues	Fallas	Cubierta	Rumbo dextral	Inversa	
	— Definida	Anticlinal	Sinclinal				
	- - - Inversa	Sinclinal inferido					
	↔ Rumbo dextral						
	▼ Inversa						
			Antropico	Denudacional	Estructural	Fluvial	Marino
			Canales artificiales	Cerros	Domos	Ciénagas	Llanuras costeras
			Embalses	Lomeríos	Laderas	Lagunas	Planos con vegetación
			Excavaciones	Montículos	Lomos	Llanuras inundación	Playas
			Llenos antrópicos	Peniplanicies	Sierras	Planos anegadizos	Terrazas marinas

Figura 28. Mapa de distribución espacial de los volcanes de lodo y las principales estructuras y unidades geomorfológicas de la zona. Fuente: propia. Para información detallada de las unidades geomorfológicas, remitirse al Anexo 1.

Como puede observarse en las figuras 28 y 29, los volcanes de lodo se encuentran especialmente hacia el W del mapa.

En la figura 28, se agrupan las unidades geomorfológicas de acuerdo con la morfología similar, sin embargo, en el [Anexo 1](#), puede observarse con detalle el nombre de cada una de las unidades.

Para el caso del ambiente denudacional dentro del grupo de *Cerros* pueden encontrarse cerros remanentes o relictos (Dcrem), cerros residuales (Dcrs) y colinas denudadas (Dcd). El grupo de *Lomeríos* está determinado por lomeríos disectados (Dldi), lomeríos muy disectados (Dlmd) y lomeríos poco disectados (Dlpd); se incluyen además los lomos denudados bajos de longitud larga (Dldebl), lomos denudados bajos de longitud media (Dldebm), lomos denudados moderados de longitud larga (Dldeml) y lomos residuales (Dlres). El grupo de *Montículos* está determinado únicamente por montículos y ondulaciones denudacionales (Dmo). Finalmente, en el grupo de *Planicies* pueden encontrarse peniplanicies (Dpn), planicies (Dp) y planicies colinadas (Dpcd).

Otras unidades menos comunes que se encuentran dentro del ambiente denudacional son: escarpes faceteados (Def), glaciares de acumulación (Dga) y Talus (Dt).

Del ambiente estructural se agruparon las unidades en domos, laderas, lomos y sierras. Para el caso del grupo de los *domos* se determinan únicamente los domos diapíricos (Sdd) por ser de interés específico en el caso de este trabajo. En el grupo de *Laderas* se encuentran las laderas de contrapendiente (Slcp) y las laderas estructurales (Sle) principalmente; además, estas laderas pueden ser de contrapendiente de cuesta (Sclc), contrapendiente de sierra homoclinal (Sshlc), contrapendiente de sierra sinclinal (Ssslc), contrapendiente de sinclinal (Slcps), estructural de cuesta (Scle) y estructural de sinclinal (Sless).

En el grupo de los *Lomos* se encuentran los lomos de falla (Slf) y lomos de presión (Slp). Finalmente, en el grupo de las *Sierras* se pueden observar las sierras anticlinales (Ssan) y homoclinales (Ssh).

Otras unidades menos comunes del ambiente estructural que pueden encontrarse son: cuestras (Sc), escarpes de meseta (Sme), ganchos de flexión (Sgf) y mesetas estructurales (Sm).

En el ambiente fluvial y lagunar se pueden encontrar cauces aluviales (Fca), ciénagas (Fci), lagunas (flg), planos anegadizos (Fpa), llanuras de inundación (Fpi) y pantanos (Fpt). Finalmente, en el ambiente marino, se pueden encontrar llanuras costeras (Mllc), planos con vegetación (Mpv), terrazas marinas (Mtm) y playas (Mpl) principalmente. Adicionalmente, se pueden encontrar islas (Mi), lagunas costeras (Mlc) y manglares (Mmg).

Respecto a las estructuras geológicas se observan fallas de tipo inversas, (las más predominantes en el área), fallas de rumbo sinistral (Falla Hibácharo), rumbo dextral (Falla del Dique) y algunas fallas cubiertas por los depósitos cuaternarios que se describieron en el capítulo de Geología (4.2). Se puede encontrar, además, 39 pliegues conformados por 17 anticlinales y 22 sinclinales y en el área se destacan el Sinclinal de El Coco y el Anticlinal de Santa Catalina, pues alrededor de estos hay mayor concentración de volcanes de lodo que cerca de otros pliegues.

En la figura 29, se hace una selección por localización de las unidades geomorfológicas que están en un radio de 500 (área del volcán) y de 1000 m (área de influencia) de los volcanes de lodo. Esto se realiza para determinar sobre cuáles unidades geomorfológicas el fenómeno de diapirismo de lodo está teniendo mayor influencia.

Se seleccionan cuatro zonas, de acuerdo con la abundancia relativa de los volcanes de lodo, donde además, se puede observar que la zona **b** presenta la mayor cantidad de pliegues cerca de las estructuras diapíricas. Entre las unidades geomorfológicas más representativas y descritas por el SGC (2015) en el mapa están:

- **Cerros remanentes o relictos (Dcrem):** prominencias topográficas aisladas, de morfología colinada, alomada o montañosa. Se presentan cimas agudas y laderas de longitud moderadamente corta a larga de forma convexa. Origen asociado a procesos de erosión.
- **Lomeríos disectados (Dldi):** prominencias en el terreno en general plano, con ondulaciones leves, cimas redondeadas y laderas cortas, producto de los lomeríos disectados .
- **Lomeríos muy disectados (Dlmd):** prominencias topográficas aisladas, de morfología colinada o alomada. Se presentan laderas cortas a moderadamente largas, de forma cóncava a rectas y pendientes abruptas a escarpadas
- **Montículos denudacionales (Dmo):** caracterizados por tener elevaciones inferiores a 50 m en el terreno. Estas geoformas se distinguen por ser suavemente inclinadas y estar relacionadas con procesos de meteorización intensa sobre los sedimentos no consolidados.
- **Planicies (Dp):** porciones de terreno extensas, planas, no confinadas, de posición baja y pendiente plana a suave, generalmente menor a 5°.
- **Peniplanicies (Dpn):** son superficies extensas, ligeramente onduladas y con repetición sistemática de cerros bajos con cimas de altura similar.
- **Domos diapíricos (Sdd):** estructuras relacionadas con la deformación tectónica asociada al ascenso vertical del diapirismo de lodo. Se manifiesta

en superficie como un cuerpo de morfología colinada con laderas cortas y convexas por donde fluye lodo.

- **Laderas estructurales (Sle):** superficie de morfología definida por planos preferentes (estratos, foliación, diaclasamientos) paralelos al sentido de la inclinación del terreno. Pueden ser de longitud larga a extremadamente larga.

- **Laderas de contrapendiente (Slcp):** superficie de morfología irregular, definida por planos dispuestos en sentido contrario a la inclinación del terreno.

9. Discusión

En la discusión de los resultados mostrados previamente, se incluye un mapa compilado para el análisis por área del volcán de lodo y la zona de influencia sobre las unidades geomorfológicas (figura 29). Este mapa se resume en cuatro sectores principales, caracterizadas por la abundancia relativa de volcanes y características geomorfológicas predominantes (ver figura 30).

Se asume que el “área del volcán” tiene un radio de 500 m a su alrededor y se determina como la zona en la que estas estructuras ejercen mayor control sobre el terreno. Por otra parte, el “área de influencia” se localiza a 1000 m alrededor de los volcanes, donde se espera que el fenómeno de diapirismo tenga influencia más indirecta sobre la morfología del sitio.

La figura 31 consta de cuatro sectores, asignados a partir de la abundancia relativa de volcanes de lodo y características geomorfológicas. Para esta discusión no se tuvieron en cuenta las unidades de los ambientes antrópico, fluvial y marino, ya que el control ejercido por los volcanes sobre el terreno se refleja principalmente en los ambientes estructural y denudacional.

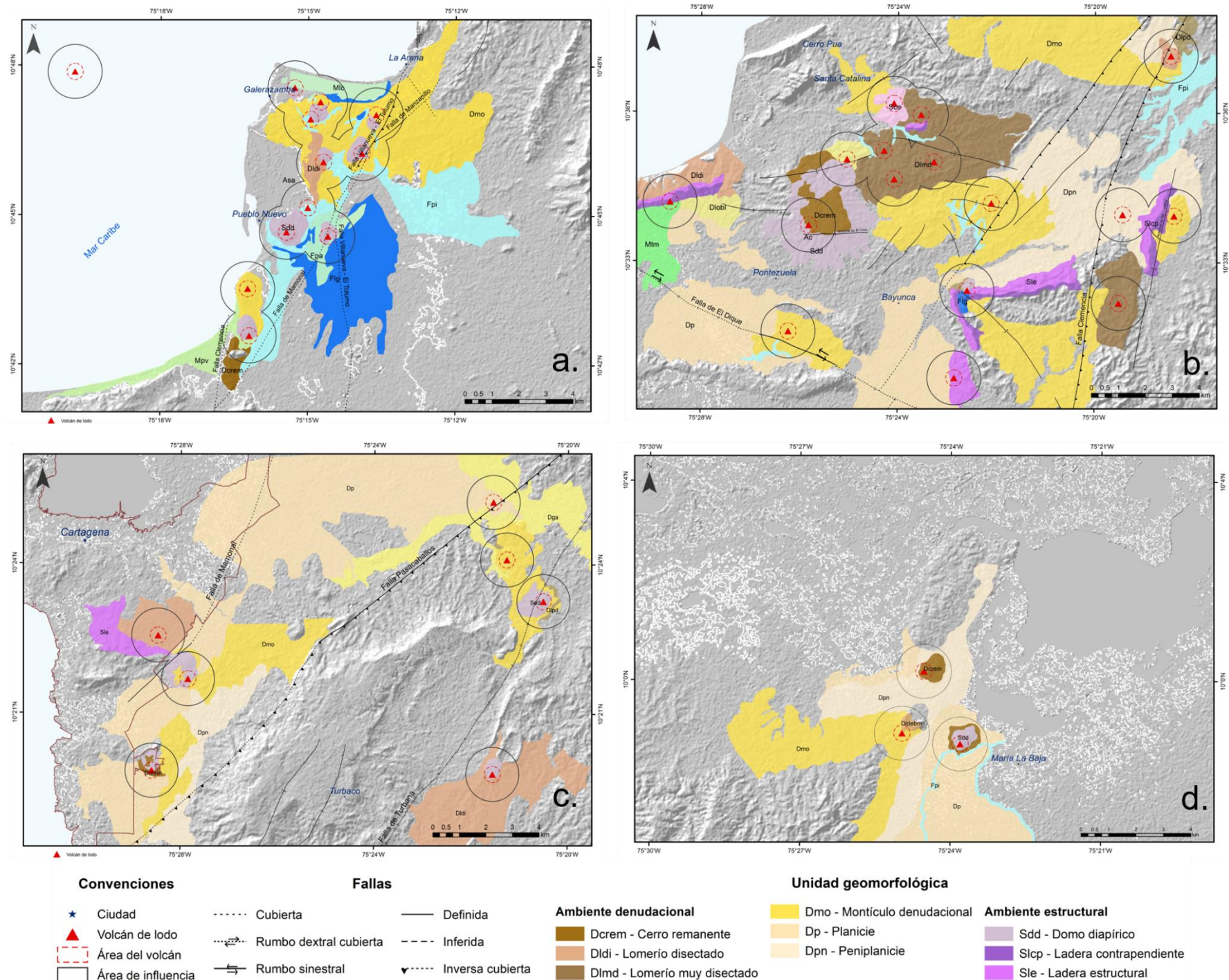


Figura 30. Acercamiento de los cuatro sectores principales de la zona de estudio, seleccionados según la abundancia relativa de volcanes de lodo y características geomorfológicas. Los sectores fueron asignados en la figura 29. Sector **a** = Galerazamba; sector **b** = Santa Catalina; sector **c** = Cartagena; sector **d** = María La Baja.

9.1. Sector Galerazamba: se caracteriza por la manifestación de 12 volcanes de lodo, entre ellos los correspondientes a Galerazamba, Las Palomas, Pueblo Nuevo, El Totumo y La Bonga.

Este sector se destaca por la aparición de todos los volcanes hacia la margen costera, y pueden observarse lo largo de la misma en un terreno, en general plano, con ondulaciones leves, cimas redondeadas y laderas cortas, producto de los lomeríos disectados (Dldi) (SGC, 2015). Adicionalmente, alrededor de los volcanes, se pueden encontrar montículos denudacionales y se distinguen por ser suavemente inclinados y estar relacionados con procesos de meteorización intensa sobre los sedimentos no consolidados (SGC, 2015).

De los doce volcanes de este sector, cuatro se encuentran hacia el oeste de la fallas de Mamonal y Villanueva – El Totumo, generándose, sobre estas, las geoformas típicas de los volcanes de lodo, conocidas como “domos diapíricos” (Sdd), que constan de estructuras colinadas, con laderas cortas y cimas planas (SGC, 2015).

9.2. Sector Santa Catalina: se encuentran 16 volcanes de lodo, siendo esta la zona con mayor abundancia de este tipo de volcanes. En relación con el sector anterior, se observa una significativa influencia por parte del ambiente estructural, encontrándose en él no solo domos diapíricos, sino también, laderas estructurales (Sle) y de contrapendiente (Slcp). Ambas se caracterizan por tener pendientes suavemente inclinadas y morfología irregular.

También se pueden hallar geoformas típicas del ambiente denudacional, como cerros remanentes (Dcrem) y lomeríos muy disectados (Dlmd), las cuales se observan como prominencias topográficas y son producto de procesos de meteorización y erosión. En el caso de los cerros se presentan cimas redondeadas y laderas cortas, mientras que los lomeríos presentan cimas agudas y estrechas y pendientes abruptas. Finalmente, se observan planicies (Dp) que son porciones extensas de terreno y pendiente plana (SGC, 2015).

Entre los 16 volcanes, se encuentran tres hacia la zona Este de la Falla Clemencia, dos sobre la Falla de Mamonal y uno hacia el norte de la Falla del Dique.

9.3. Sector Cartagena: se evidencian siete volcanes de lodo, tres de ellos muy cerca de la línea de costa del municipio de Cartagena, y cuatro más hacia el municipio de Turbaco.

A diferencia de los dos sectores anteriores, en estos se evidencia un control casi exclusivo por parte del ambiente denudacional, ya que las únicas geoformas del ambiente estructural que se evidencian, son los domos diapíricos y una ladera estructural. Las dos geoformas más características de este sector son las planicies (Dp) y las peniplanicies (Dpn), siendo estas últimas, superficies extensas, ligeramente onduladas y con repetición sistemática de cerros bajos con cimas de altura similar (SGC, 2015).

Entre los siete volcanes de lodo, dos se encuentran sobre la Falla de Mamonal, uno sobre la Falla Pasacaballos y uno sobre la Falla de Turbana.

9.4. Sector María La Baja: de los cuatro sectores, este es el único en donde no se observa manifestación de volcanes de lodo cerca de la línea de costa; se caracteriza por presentar únicamente tres de estas estructuras y no estar asociadas a fallas ni a control por parte del ambiente estructural.

Estas manifestaciones diapíricas en el sector de María La Baja se encuentran en planicies, peniplanicies y montículos denudacionales rodeados por un amplio sistema fluvial y lagunar, compuesto principalmente por ciénagas, lagunas y llanuras de inundación, sobre las cuales, los volcanes de lodo no parecen ejercer control en la configuración morfológica del terreno.

Con el fin de determinar cuáles unidades geomorfológicas son las más afectadas por la presencia de los volcanes de lodo, en las figuras 31, 32 y 33 se encuentran gráficas de nueve de las unidades principales que se encuentran dentro del área de influencia de los volcanes de la zona de estudio.

En la figura 31 se observa la gráfica correspondiente a la cantidad de veces que se puede encontrar la misma unidad geomorfológica dentro del área de influencia de cada volcán; en la figura 32, el área en km² total de cada unidad. Finalmente, en la figura 33, se encuentra el porcentaje total cubierto por parte de las unidades geomorfológicas dentro del área de influencia.

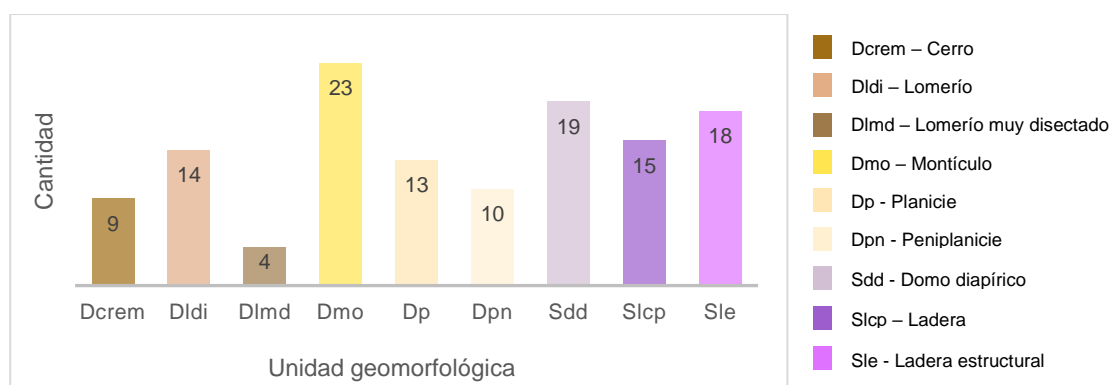


Figura 31. Frecuencia relativa de unidades geomorfológicas dentro del área de influencia determinada en la figura 30 (radio de 1 km).

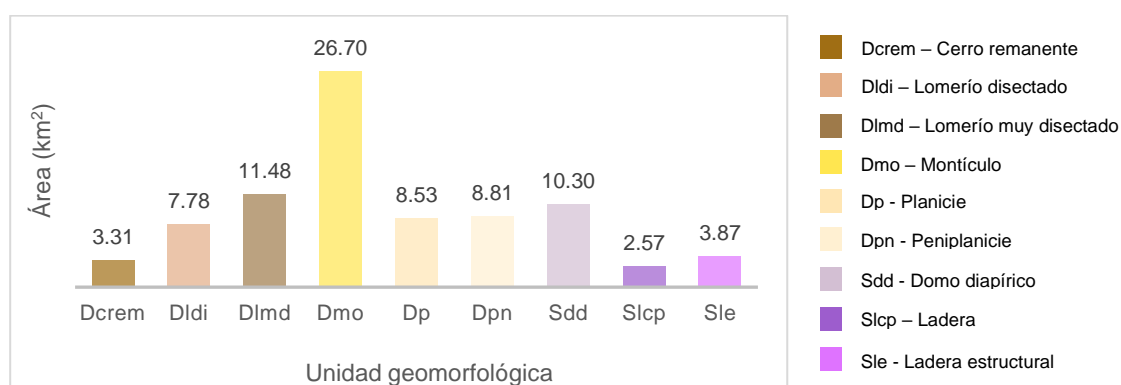


Figura 32. Área total de cada unidad geomorfológica en un radio de 1 km alrededor de los volcanes de lodo

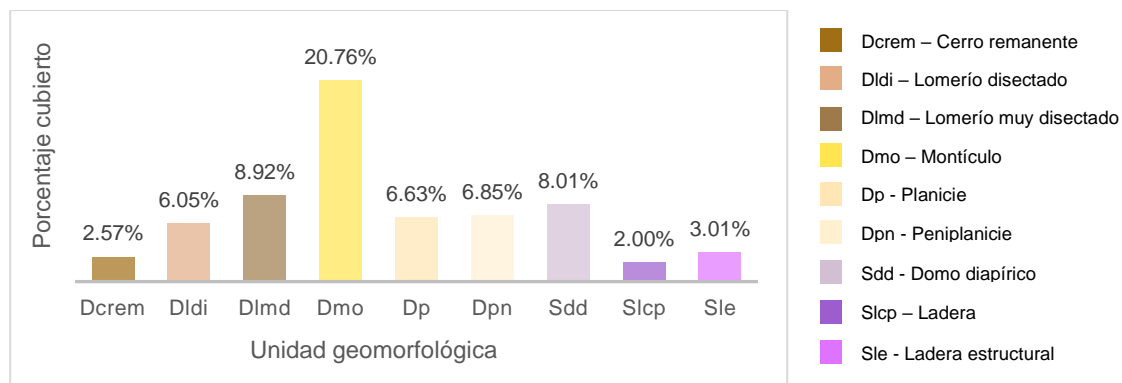


Figura 33. Porcentaje total de área cubierto por las nueve unidades geomorfológicas principales que se encuentran dentro del área de influencia de los volcanes de lodo (1 km)

La figura 31 permite observar que las unidades geomorfológicas que más se repiten son los montículos denudacionales (Dmo), domos diapíricos (Sdd) y laderas estructurales (Sle).

Por otro lado, en la figura 32 se evidencia que a pesar de que las laderas estructurales (Sle) se encuentran en gran cantidad (de acuerdo con la figura 31), el área cubierta por estas es mínima en comparación con otras unidades como lomeríos muy disectados (Dlmd) y peniplanicies (Dpn). No obstante, los montículos denudacionales (Dmo) y los domos diapíricos (Sdd), siguen siendo las unidades más expuestas en el área.

Teniendo en cuenta que el total de las áreas de influencia de los volcanes de lodo son de 128.65 km² y que la sumatoria total de las nueve unidades, identificadas en la figura 32, es de 83.36 km², es necesario considerar que:

- En la gráfica no se muestran las unidades geomorfológicas correspondientes a los ambientes antrópico, fluvial y marino, cuyas áreas sumadas representan 16.34 km².
- En la gráfica solo se observan seis de catorce unidades geomorfológicas que hacen parte del ambiente denudacional, y tres de ocho que hacen parte del ambiente estructural. Esto se debe a que el área total

representada por estas unidades era inferior a 2.5 km² y no se observa mayor control en estas por parte de los volcanes de lodo.

- Las otras unidades geomorfológicas encontradas en el área de influencia y pertenecientes al ambiente denudacional son: escarpes faceteados (Def), glacis de acumulación (Dga), lomos denudados bajos de longitud larga (Dldebl), lomos denudados bajos de longitud moderada (Dldebm), lomos residuales (Dlres) y talus (Dt).
- Las otras unidades geomorfológicas que corresponden al ambiente estructural halladas dentro del área de influencia son: cerros estructurales (Sce), lomos de falla (Slf), escarpes de línea de fallas (Slfe), lomeríos estructurales (Sloe) y lomos de presión (Slp).

En la figura 33 se observa el porcentaje de área abarcado por cada unidad geomorfológica alrededor de los volcanes de lodo.

Nuevamente se observa que los montículos denudacionales (Dmo), lomeríos muy disectados y domos diapíricos (Sdd) son las unidades geomorfológicas más predominantes dentro del área de influencia de los volcanes de lodo. Las nueve unidades geomorfológicas que se encuentran en el área, corresponden al 65%, y el 25% restante está distribuido entre las unidades geomorfológicas correspondientes a los ambientes antrópico, fluvial, marino, denudacional y estructural que se mencionaron de manera sucinta en la descripción de la figura 32.

Es importante resaltar que, aunque algunas unidades geomorfológicas como las laderas estructurales (Sle) y las laderas de contrapendiente (Slcp) sean abundantes en la zona (18 y 15 respectivamente), el porcentaje de área que estas ocupan, no es mayor al 3%. Caso contrario, sucede con los lomeríos muy disectados (Dlmd), pues a pesar de que solo se ven cuatro de ellos, el porcentaje total que representan es de 8.92% siendo la segunda geoforma que más terreno ocupa.

Para el desarrollo de esta discusión, hay que considerar que los domos diapíricos se relacionan con la deformación tectónica asociada al ascenso vertical del diapirismo de lodo, y posteriormente, este fenómeno se manifiesta en superficie como un cuerpo de morfología colinada con laderas cortas por donde fluye lodo (SGC, 2015) y es producto de la compresión de la zona.

Los montículos denudacionales, identificados por estar asociados con procesos de meteorización y erosión intensa sobre sedimentos no consolidados, son la unidad más común de la zona de estudio, adicionalmente, es importante tener en cuenta que la región cuenta con un clima semi árido y una humedad relativa anual muy alta (>80%), lo que favorece que los procesos denudativos en el área se aceleren más. Estos procesos denudacionales que modelan y atenúan el paisaje, actúan principalmente sobre las geoformas que sobresalen en el terreno, tal como es el caso de los domos diapíricos, y probablemente es por esta razón que se encuentran más montículos denudacionales que domos diapíricos dentro del área de los volcanes de lodo y área de influencia.

Espacialmente es posible observar que hay mayor cantidad de volcanes de lodo hacia la zona norte del mapa en los sectores Galerazamba y Santa Catalina; así mismo, se observa una tendencia hacia el W del mapa.

En el sector Galerazamba, por ejemplo, se evidencia que todos los volcanes de lodo se encuentran cerca de la línea de costa, y en el sector Santa Catalina, 12 de los 16 volcanes que pertenecen a este sector, también se encuentran al W de la falla de Mamonal, mostrando una preferencia hacia la margen costera. No obstante, los sectores Cartagena y María La Baja, muestran una tendencia preferencial hacia adentro del continente, así mismo, una disminución en la cantidad de estas estructuras diapíricas.

Como se mencionó anteriormente, las etapas para que se manifiesten los volcanes de lodo son (ver figura 34):

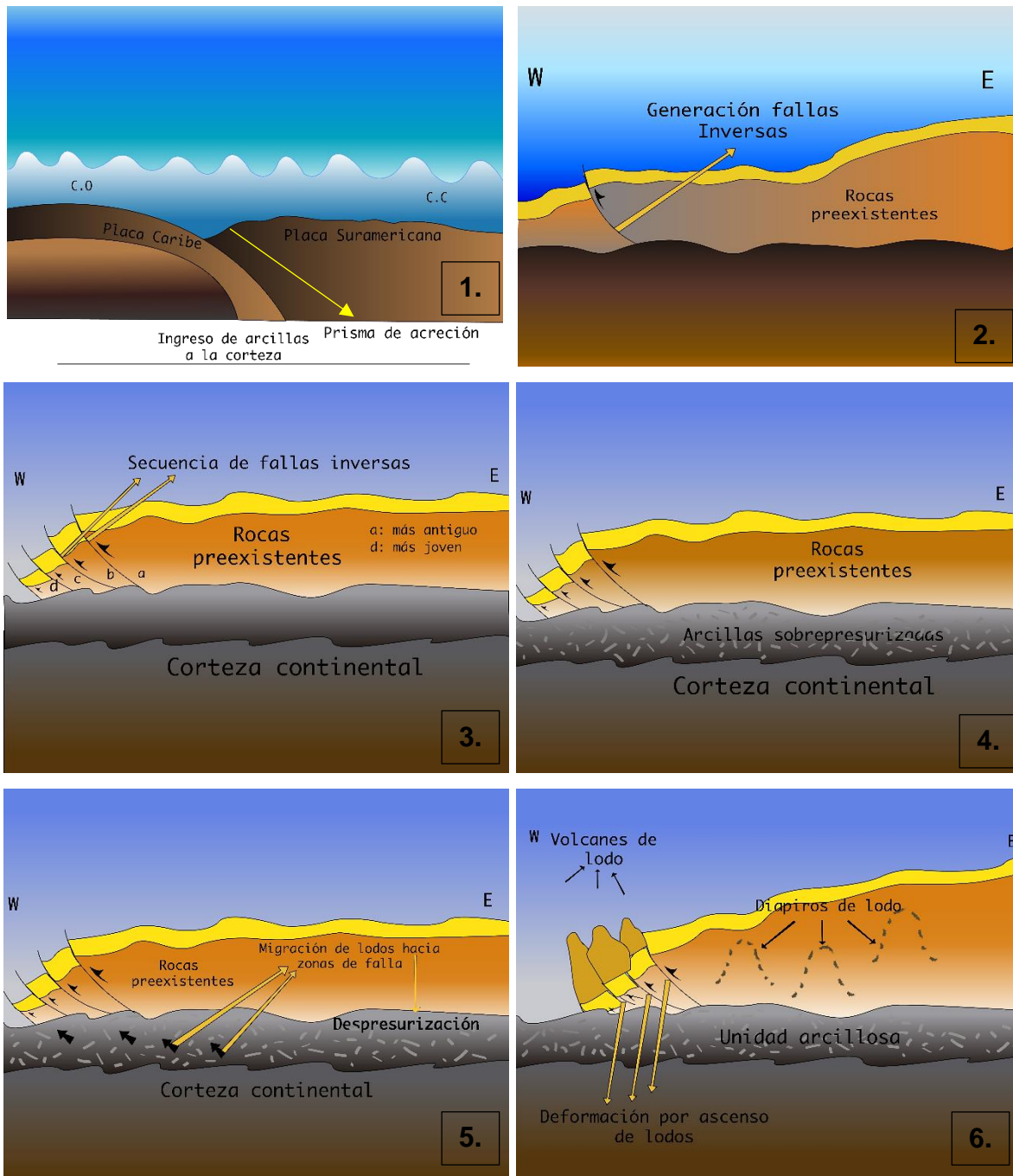


Figura 34. Proceso general de la formación de volcanes de lodo

1. Esfuerzos compresionales debido a la convergencia de la placa Caribe bajo la placa Suramericana. A medida que se da el proceso de subducción, los sedimentos principalmente pelágicos, y algunos continentales por parte del río Magdalena, entran en la zona de subducción.
2. Generación del prisma de acreción conocido como el Cinturón del Sinú y generación de un sistema de fallas inversas.
3. Mientras se da el proceso de compresión, se generan nuevas fallas (más jóvenes hacia la línea de costa).
4. La combinación de esfuerzos compresionales y sedimentos pelágicos generan arcillas sobrepresurizadas en profundidad debido a la compactación.
5. Migración de lodos en profundidad hacia las zonas de falla liberándose de la sobrepresión a la que estaban sometidas.
6. Exposición de materiales diapíricos en la superficie (volcanes de lodo) deformando a su vez las capas de roca preexistentes.

Teniendo en cuenta las etapas anteriormente descritas y la figura 34, es posible deducir que la mayoría de los volcanes de lodo se encuentran sobre las fallas Mamonal, Clemencia y Pasacaballos, ya que estas estructuras permiten el flujo de lodo desde la profundidad hasta la superficie. En el capítulo del marco teórico, se explica que los lodos que se encuentran sobrepresurizados en el subsuelo buscan estructuras como grietas o fallas para emerger a la superficie, y estas fallas, generadas por los esfuerzos compresivos causados por la convergencia de las placas Caribe y Suramericana, facilitan la migración de estos materiales.

La falla de Mamonal, siendo la estructura más occidental del mapa y la más joven, permite evidenciar la aparición de 25 de los 37 volcanes de lodo del área de estudio, sobre y hacia el W de esta.

Es probable que se encuentren más estructuras diapíricas sobre esta falla que sobre el resto, ya que al ser la más joven, los procesos denudativos que modelan el paisaje no han actuado tan rápido, mientras que, en las fallas más antiguas como la Clemencia y Pasacaballos, los procesos denudativos pudieron haber borrado la evidencia de la existencia de volcanes de lodo anteriores. Es decir, que la falla de Mamonal no necesariamente debe tener una característica particular para que sobre ella se puedan manifestar volcanes de lodo, sino que, por ser la más joven, los volcanes que se encuentran sobre ella también lo son, y no han sufrido con tanta intensidad los procesos denudacionales que afectan la zona.

Así mismo, se puede notar que los volcanes de lodo se encuentran en porciones altas del terreno, esto debido a que al ser producto de la compresión tectónica, se manifiestan como protuberancias en la superficie una vez se exponen como volcanes de lodo.

10. Conclusiones y recomendaciones

Para la presentación de este trabajo de grado se estudiaron las estructuras geológicas del Terreno de Sinú – San Jacinto y que se ubican dentro de la zona de estudio. Dichas estructuras fueron examinadas con el fin de analizar cómo está condicionada la geomorfología actual del área.

Dentro de la información secundaria que se analizó se encuentran mapas geológicos, geomorfológicos, temáticos e imágenes satelitales en diferentes temporalidades; esto para determinar si existe una relación directa entre las estructuras de la zona, con la morfología actual del terreno. Para el análisis de esta relación se extrajeron fallas, pliegues y volcanes de lodo como principales estructuras.

Los resultados obtenidos fueron los mapas incluidos en las figuras 28, 29 y 30, donde se puede observar una geomorfología detallada y la ubicación relativa de las principales estructuras. A partir de estos mapas, se puede deducir que, el diapirismo de lodo al ser producto de la compresión causada por la subducción de la Placa Caribe bajo la Placa Suramérica, se generan cuerpos que al exponerse a la superficie modifican la morfología en general suave del terreno (excepto por el sector de María La Baja). Adicionalmente, los procesos de expulsión de lodo generan procesos denudacionales ocasionando que la superficie sea desnivelada por la formación de cerros residuales.

A pesar de existir múltiples estudios sobre el diapirismo de lodo en el Caribe colombiano, con este trabajo de grado se pretende analizar si este fenómeno tiene una influencia significativa en la configuración morfológica del terreno que se encuentra alrededor de los volcanes de lodo. Adicionalmente, se recomienda, para futuras investigaciones, tener en cuenta el factor climático como otra causa condicionante para la morfología del área, ya que al ser un sector con una humedad relativa mayor del 80%, puede acelerar los procesos denudacionales.

Es importante resaltar que a pesar no de tener la posibilidad de realizar trabajo de campo, actualmente puede encontrarse gran cantidad de información secundaria disponible, a partir de la cual se puede hacer una aproximación al análisis de la relación entre la geomorfología, la geología estructural y el diapirismo de lodo.

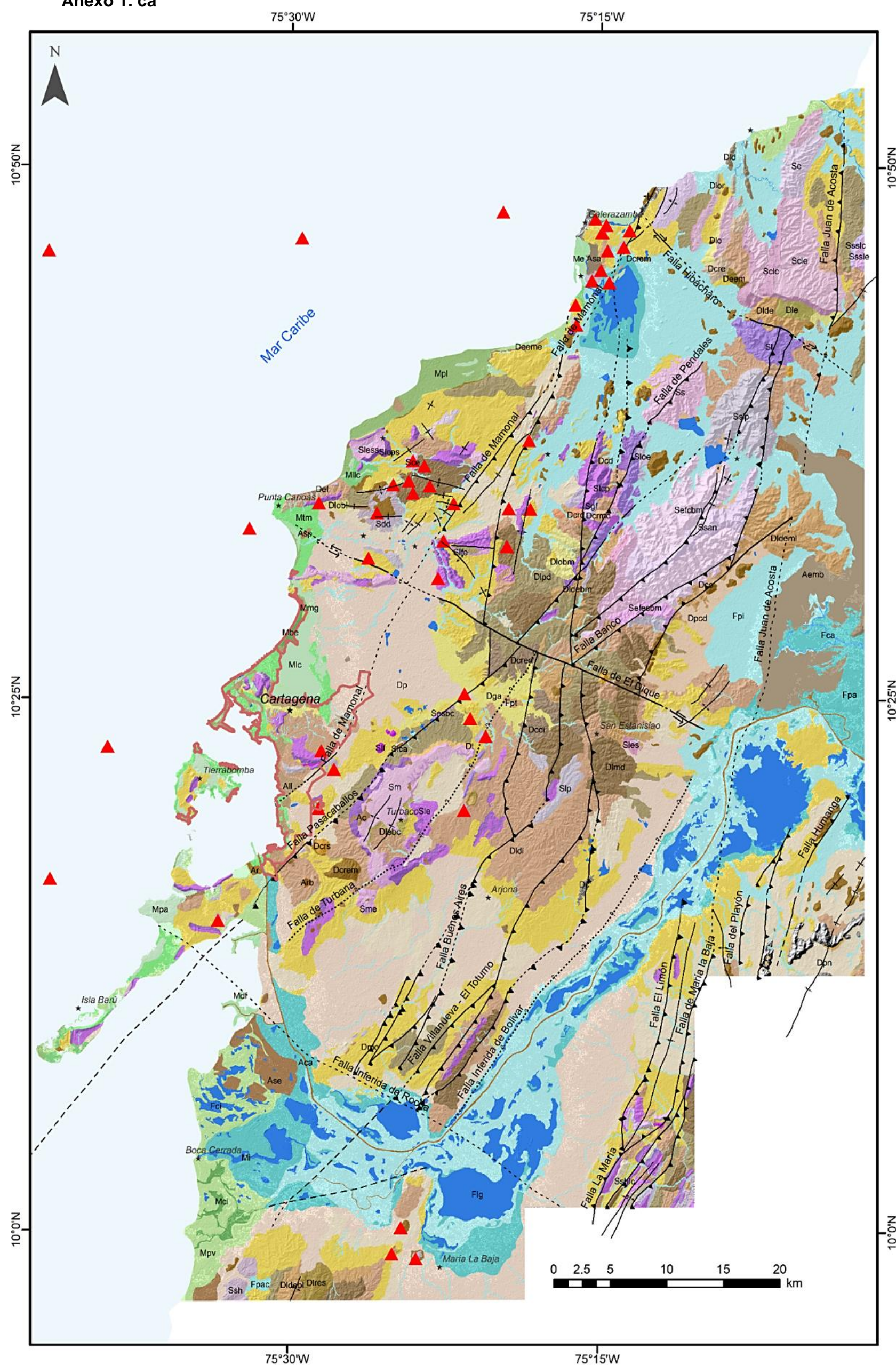
Referencias

- ANH Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2008. Proyecto cartografía geológica y modelamiento estructural de las cuencas de Urabá y Sinú-San Jacinto a partir de la interpretación de imágenes de sensores remotos y monitoreo sísmico. Bogotá.
- Aguilera, R., 2011. Sinú and San Jacinto basins, in: Petroleum Geology of Colombia. Universidad EAFIT, p. 112.
- Anderson, F.M., 1926. Original Source of oil in Colombia, Tulsa, 10(4): 382-404.
- Andrade-Amaya, C., Carvajal-Perico, H., Ferrero-Ronquillo, A., León-Rincón, H., & Mora-Páez, H., 2016. Sobre cambios en la línea de costa entre 1735 y 2011 y la subsidencia en la Bahía de Cartagena de Indias, Colombia. Ciencias de la Tierra, 94-106.
- Barrera, R., 2001. Geología de las planchas 16 – 17 Galerazamba y Barranquilla, escala 1:100 000. Memoria explicativa. Bogotá: Ingeominas
- Barrera, R., Reyes, G.A., Guzmán, G., Franco, J.V., 2001. Geología de la plancha 31 Campo de la Cruz, escala 1:100 000. Memoria explicativa. Bogotá: INGEOMINAS
- Briceño, L y Vernet, G., 1992. Manifestaciones del diapirismo arcilloso en el margen colombiano del caribe. Geofísica colombiana, No. 1: 21-30
- Bueno, R., 1970. Guidebook to the geology of the Tubará region, Lower Magdalena Basin. Geology Field Trips, Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicists. Bogotá.
- Bürgl, H., 1957. Resumen de la Estratigrafía de Colombia. En: Informe 1248, INGEOMINAS Bogotá.
- Caro, P. et al., 1985. Geología del Departamento de Atlántico. Ingeominas, Informe 1940. Bogotá: INGEOMINAS
- Carvajal, J. H., 1996. Amenazas geológicas relacionadas con la erupción del volcán de lodo El Reposo - Bayunca. Departamento de Bolívar. Informe de atención de emergencias. Inédito. Ingeominas 12 p. Cartagena de Indias.
- Carvajal, J. H., 2008. Primeras aproximaciones a la estandarización de la geomorfología en Colombia. Informe Ingeominas, inédito.
- Carvajal, J. H., Mendivelso, D., Forero, H., Castiblanco, C., Pinzón, L. y Prada, M., 2010. Investigación del diapirismo de lodos y evolución costera del Caribe colombiano. Geomorfología Sector 1. 207 p. Informe Ingeominas inédito. Bogotá.
- Carvajal, H., 2017. Volcanismo de Lodo del Caribe Central Colombiano: características del volcanismo de lodo. Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Colombiano.
- Carvajal, H., Mendivelso, D., 2017. Volcanismo de Lodo del Caribe Central Colombiano: catálogo de los volcanes de lodo. Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Colombiano.

- Cediel, F., Shaw, R.P. and Cáceres, C., 2003. Tectonic assembly of the Northern Andean Block. The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation, and Plate Tectonics. 79. 815-848.
- Christofferson, E., 1984. Structure and magnetism of the Central Caribbean Sea floor. Research and Proposal, Department of Geology and Geography. Howard University, Washington. 32pp.
- Clavijo J., y Reyes, G., 1996. Geología estructural de los cinturones de San Jacinto y Sinú Norte. Mem. VII Congr. Col. Geol., Bogotá, 2 p.
- Duque-Caro, H., 1979. Major structural elements and evolution of Northwestern Colombia. Geological and Geophysical Investigations of Continental Margins 29, 329-351.
- Duque-Caro, H., 1984. Estilo estructural, diapirismo y episodios de acrecimiento del terreno Sinú-San Jacinto en NW de Colombia. Boletín Geológico de Ingeominas 27 No 2, 1-29
- Galloway, W and Jackson, M., 1984. Structural and depositional styles of Gulf Coast Tertiary continental margins: Application to hydrocarbon exploration. American association of Petroleum Geologists, Continuing Education Course Note Series 25, 1-225.
- Gansser, A., 1973. Facts and theories on the Andes: Journal of the Geological Society, London, v. 129, p. 93–131.
- Giraldo, C., Hermoza, W., García-Mojonero, C., 2012. Volcanes de lodo y deformaciones de origen gravitacional en el Golfo de Cádiz. Exploración del Departamento de Geología.
- Gómez, J., 2015. Dune and Coastal Evolution in Isla Salamanca National Park, COLOMBIA (Tesis de Maestría). Wilfrid Laurier University, Waterloo, Canadá.
- González, O., Rodríguez, A.L., 2005. Estudio experimental sobre diapirismo de lodo: “relación entre la materia orgánica presente en el lodo y la altura de los domos diapíricos”. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Guzmán, G., Gómez, E., Serrano, B., 2004. Geología de los cinturones del Sinú, San Jacinto y borde occidental del Valle Inferior del Magdalena Caribe colombiano. Bogotá: INGEOMINAS.
- Guzmán, G., 2007. Stratigraphy and sedimentary environment and implications in the Plato basin and the San Jacinto Belt northwestern Colombia. University of Liège.
- Hedberg, H.D., 1974. Relation of Methane Generation to Undercompacted Shales, Shale Diapirs and Mud Volcanoes. The American Association of Petroleum Geologist Bulletin V. 58, No 4, 661673.
- Henao, L., 1951. Geología del Departamento del Atlántico. Instituto Geológico Nacional, Informe 754. Bogotá.
- Higgins, G.E. and Saunders, J.B., 1974. Mud Volcanoes - Their Nature and Origin: Contributions to Geology and Palaeobiology of Caribbean and Adjacent Areas. Verh. Naturforsch. Ges. Basel, 84, 1974.
- Hovland, M., Hill, A and Stokes, D., 1997. The structure and geomorphology of the Dashgil mud volcano, Azerbaijan. Geomorphology. 21. 1-15.

- INGEOMINAS, Instituto Colombiano de Geología y Minería, 2010. Investigación del diapirismo de lodo y evolución costera del caribe colombiano. Bogotá: INGEOMINAS
- Kassem, T., Cáceres, C. y Cucalon, I., 1967. Geología del Cuadrángulo E-8 Sincelejo. Informe inédito. Servicio Geológico Nacional. Bogotá.
- Kopf, A. and Robertson, A., 1998. Tectonic Setting and Processes of Mud Volcanism on the Mediterranean, Ridge Accretionary Complex: Evidence from Leg 160. Proceedings of Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 160, 1998
- Kopf, A. J., 2002. Significance of mud volcanism. *Review of Geophysics* 40 (2)
- Lozano, P., Zamora, N., 2014. Anexo K Compilación de la Cuenca de Sinú - San Jacinto. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Marín, J.P., Bermúdez, H.D., Aguilera, R., Jaramillo, J.M., Rodríguez, J.V., Ruiz, E.C y Cerón, M.R., 2010. Evaluación geológica y prospectividad sector Sinú - Urabá. *Boletín de Geología* Vol. 32, N°1.
- Meijer, P. T., 1995. Dynamics of active continental margins: The Andes and the Aegean Region: Doctoral Dissertation, University of Utrecht, Netherlands, 218 p.
- Milkov, A.V., 2000. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. *Marine Geology* 167, 29–42.
- Molina, A. (1993). Estudio sedimentológico y morfológico de la plataforma continental Caribe entre el sector de Santa Marta y Punta Morro Hermoso. *Bol. Cient. CIOH*, 14, 67-78.
- Morgan, J.K. and Karig, D.E., 1965. Décollement Processes At The Nankai Accretionary Margin, Southeast Japan. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100/B8, 15221-15231, 1995.
- O'Brien, G.D., 1968. Survey of diapirs and diapirismo, in Braustein, J., and O'Brien, G.D., eds.; *Diapirism and diapirs: American Association of Petroleum Geologists Memoir* 8, p. 1-9.
- Oppo, D., Chan, M.A., Berry, C and Komatsu, G., 2020. Shapes of Mud Volcanoes: Geomorphic similarities, differences, and implications for Mars. University of Louisiana. 51st Lunar and Planetary Science Conference.
- Reyes, G.A., Guzmán, G., Barbosa, G., Zapata, G., 2001. Geología de las planchas 23, Cartagena y 29 – 30 Arjona, escala 1:100 000. Memoria explicativa. Bogotá: INGEOMINAS
- Reyes, G.A., Zapata, G., 2001. Geología de la plancha 24, escala 1:100 000. Memoria explicativa. Bogotá: INGEOMINAS
- Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2015. Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Bogotá.
- Ujueta-Lozano, G., 2007: Tectónica de bloques, delimitados por lineamientos de dirección NO-SE y NNE-SSO a NE-SO en el norte y nordeste de Colombia y en el noroccidente de Venezuela. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. *GEOLOGÍA COLOMBIANA*, 32, pp. 3-20.

- Velásquez, E., 1999. Contribution méthodologique a la prise en compte du milieu physique dans la planification environnementale du territoire en zone montagnese de Colombie. Tesis de PhD. Francia: Université de Grenoble, 310 pp.
- Vernette, G., 1985. La plateforme continental caraibe de Colombie (du debocche du Magdalena au Golfe de Morrosquillo) Importance du diapirisme argileux sur la morphologie et la sedimentation. Tesis de Doctorado.
- Vernette, G., 1989. Examples of diapiric control on shelf topography and sedimentation patterns on the Colombian Caribbean continental shelf. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 2, No. 4: 391-400
- Vernette, G., Mauffret, A., Bobier, C., Briceño, L and Gayet, J., 1992. Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian Margin. *Tectonophysics* (202): 335-349
- Vernette, G., Álvarez-León, R., Mendoza, L. A., 2003. Factores de formación de las lagunas costeras del suroeste del Caribe colombiano. *Acta Cient. Venez.* 54 (3): 180 - 188.
- Vernette, G., Correa, I.D. y Bernal, J., 2012. Introducción A los cambios del nivel del mar y sus consecuencias sobre la zona costera. Universidad Nacional de Colombia



Distribución espacial de volcanes de lodo y las principales estructuras y unidades geomorfológicas de la zona de estudio




Convenciones

- ☐ Cartagena
- * Ciudad / Municipio
- ☒ Volcán de Iodo

Fallas

- | | | | |
|-------|-----------------|------|----------|
| | Cubierta | ———— | Definida |
| ↔ | Rumbo dextral | ---- | Inferida |
| ↔ | Rumbo sinistral | ▼▼ | Inversa |

Plieques

-  Anticlinal
 Sinclinal
 Sinclinal inferido

Unidad geomorfológica

Ambiente antrópico

-  Ac - Cantera
-  Aca - Canal artificial
-  Aemb - Embalse
-  All - Lleno antrópico
-  Ar - Planos de llenos antrópicos
-  Arb - Relleno sanitario
-  Asa - Salinas
-  Ase - Excavaciones
-  Asp - Superficies de explanación

Ambiente fluvial y lagunar

- Fca - Cauce aluvial
- Fci - Ciénaga
- Flg - Laguna
- Fpa - Plano anegadizo
- Fpac - Planicie aluvial confinada
- Fpi - Llanura de inundación
- Fpt - Pantano

Ambiente marino y costero

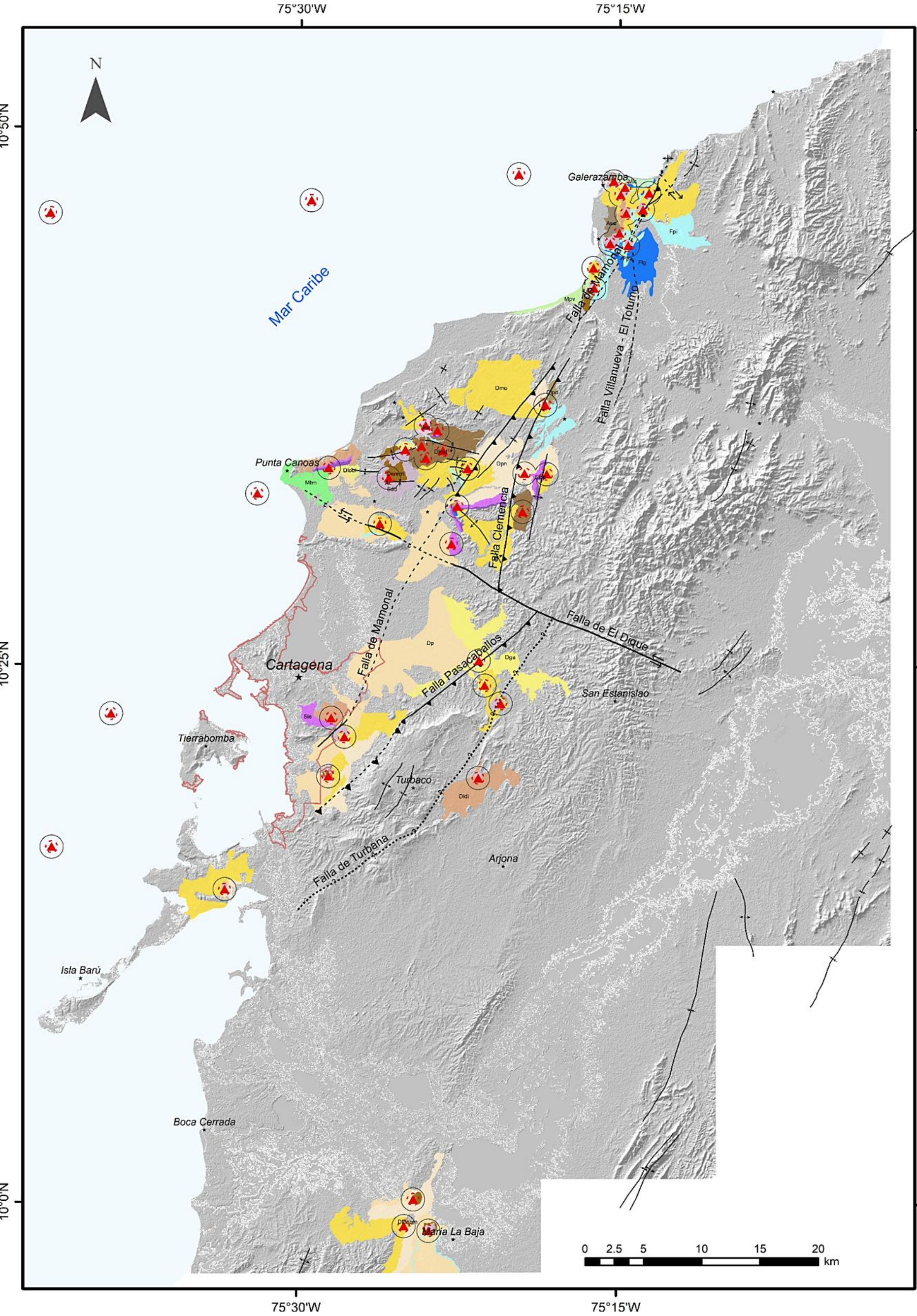
- Mci - Canales intermareales
- Mdf - Delta de flujo de marea
- Me - Espiga
- Mi - Isla
- Mlc - Laguna costera
- MIlc - Llanura costera
- Mmg - Manglar
- Mpa - Plataforma de abrasión
- Mpl - Playas
- Mpv - Planos con vegetación
- Mtm - Terraza marina

Ambiente denudacional

- | | |
|--------|--|
| Dcd | - Colina denudada |
| Dcdi | - Colina disectada |
| Dco | - Cono coluvial |
| Dcrd | - Colina residual disectada |
| Dcre | - Colina remanente |
| Dcred | - Colina remanente disectada |
| Dcrem | - Cerro remanente |
| Dcrmd | - Colina residual muy disectada |
| Dcrs | - Cerro residual |
| Deem | - Escarpe de erosión mayor |
| Deeme | - Escarpe de erosión menor |
| Def | - Escarpe facetado |
| Dga | - Glacis de acumulación |
| Dld | - Loma denudada |
| Dlde | - Lomo denudado |
| Dldebl | - Lomo denudado bajo de longitud larga |
| Dldebm | - Lomo denudado bajo de longitud media |
| Dldeml | - Lomo denudado moderado de longitud larga |
| Dldi | - Lomerío disectado |
| Dle | - Ladera erosiva |
| Dlebc | - Ladera erosiva baja de longitud corta |
| Dlmd | - Lomerío muy disectado |
| Dlo | - Ladera ondulada |
| Dlobl | - Ladera ondulada baja de longitud corta |
| Dlobm | - Ladera ondulada baja de longitud media |
| Dlor | - Loma residual |
| Dlpd | - Lomerío poco disectado |
| Dlres | - Lomo residual |
| Dmo | -Montículo denudacional |
| Dp | - Planicie |
| Dpcd | - Planicie colinada denudada |
| Dpn | - Peniplanicie |
| Dt | - Talus |

Ambiente estructural

- | | |
|---------|--|
| Sc | - Cuesta |
| Sce | - Cerro estructural |
| Sclc | - Ladera contrapendiente de cuesta |
| Scle | - Ladera estructural de cuesta |
| Sdd | - Domo diapírico |
| Sefcbm | - Espolón facetado bajo de longitud larga |
| Sefesbm | - Espolón festoneado bajo de longitud media |
| Sesbc | - Espolón bajo de longitud corta |
| Sgf | - Gancho de flexión |
| Sl | - Lomos |
| Slca | - Ladera de contrapendiente de anticlinal |
| Slcp | - Ladera de contrapendiente |
| Slcps | - Ladera de contrapendiente de sinclinal |
| Sle | - Ladera estructural |
| Sles | - Ladera escalonada |
| Sless | - Ladera estructural de sinclinal |
| Slf | - Lomo de falla |
| Slfe | - Escarpe de línea de falla |
| Sloe | - Lomeríos estructurales |
| Slp | - Lomo de presión |
| Sm | - Meseta estructural |
| Sme | - Escarpe de meseta |
| Ss | - Sierra |
| Ssan | - Sierra anticlinal |
| Ssh | - Sierra homoclinal |
| Sslp | - Sierra y lomo de presión |
| Sslc | - Ladera contrapendiente de sierra sinclinal |
| Sssle | - Ladera estructural de sierra sinclinal |



Área de influencia diapírica y estructural sobre unidades gomorfológicas

Convenciones

- Cartagena

Ciudad / Municipio

Mar Caribe
- Volcán de Iodo

Área del volcán

Área de influencia

Fallas

Pliegues

- Cubierta

Rumbo dextral

Rumbo sinistral
- Definida

Inferida

Inversa
- Anticlinal

Sinclinal

Sinclinal inferido

Unidad geomorfológica

Ambiente denudacional

- Dcrem - Cerro remanente
- Dga - Glacis de acumulación
- Dldeb - Lomo denudado bajo de longitud media
- Dldi - Lomerío disectado
- Dlmd - Lomerío muy disectado
- Dlobl - Ladera ondulada baja de longitud corta
- Dlpd - Lomerío poco disectado
- Dmo - Montículo denudacional
- Dp - Planicie
- Dpn - Peniplanicie

Ambiente estructural

- Sdd - Domo diapírico
- Slcp - Ladera contrapendiente
- Sle - Ladera estructural

Ambiente fluvial

- Flg - Laguna
- Fpa - Plano anegadizo
- Fpi - Llanura inundación